



João Nuno Vicente dos Santos

Metodologias de Pós-Processamento em Ensaios de Determinação da Rigidez em Misturas Betuminosas

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientador: Prof. Doutor Rui Alexandre Lopes Baltazar Micaelo

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Ildi Cismasiu
Arguente(s): Prof. Doutora Ana Brás
Vogal(ais): Prof. Doutor Rui Alexandre Lopes Baltazar Micaelo



**FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

Janeiro de 2012

Metodologias de Pós-Processamento em Ensaaios de Determinação da Rigidez em Misturas Betuminosas

COPYRIGHT

João Nuno Vicente dos Santos

Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade Nova Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

A concretização deste trabalho só foi possível com a disponibilidade demonstrada pelo Professor Doutor Hugo Silva que teve a simpatia de fornecer os dados provenientes da sua tese de Doutoramento para o estudo no presente trabalho, a ele o meu muito obrigado pela disponibilização dos mesmos.

Pelo apoio e acompanhamento, agradeço ao meu orientador, o Professor Doutor Rui Micaelo, que esteve sempre disponível para ajudar e clarificar qualquer dúvida que surgiu, agradeço ainda a sua compreensão e o facto de me incentivar sempre a fazer melhor.

Aos meus pais, com quem sempre pude contar, agradeço todo o apoio que deram ao longo da minha vida e que me permitiu ter forças para chegar ao fim deste percurso universitário.

Pela disponibilidade e ajuda ao longo dos anos, quero agradecer ao meu irmão que sempre me apoiou ao longo da vida e da presente dissertação, dando uma contribuição preciosa para a conclusão da mesma.

Agradeço a toda a minha família que de um modo ou de outro teve impacto na minha vida e naquilo que sou hoje.

Não posso deixar também de agradecer a todos os meus amigos e colegas de curso, que com a sua amizade e conhecimentos me ajudaram a avançar neste curso e também na vida.

Por fim quero agradecer à Catarina. O seu amor, a sua compreensão, o seu carinho e apoio foram fundamentais para a concretização desta dissertação, incentivando o meu trabalho e não deixando que me afastasse deste objectivo final.

A todos o meu muito obrigado.

Resumo

O objectivo deste trabalho é estudar as expressões de ajuste a séries de dados resultantes de ensaios para determinação do módulo de rigidez e ângulo de fase de misturas betuminosas. Ao longo do trabalho analisam-se os dados obtidos pelo Professor Hugo Silva no seu trabalho de doutoramento *“Caracterização do Mastique Betuminoso e da Ligação Agregado-Mastique – Contribuição para o Estudo do Comportamento das Misturas Betuminosas”*, utilizando procedimentos para o ajustamento aos dados com base nas equações apresentadas por Liu e colaboradores (Liu et al (2010)) e verificando estatisticamente a qualidade da adequação de cada equação aos dados.

O comportamento em serviço dos mastiques betuminosos e das misturas betuminosas depende da sua composição. Diversas misturas e mastiques betuminosos foram caracterizados mecanicamente em laboratório com ensaios de compressão-tracção repetida de acordo com a norma *EN 12697-26 “Misturas Betuminosas – Métodos de teste para misturas betuminosas a quente – Parte 26: Rigidez”* (Silva, H., 2005).

No presente trabalho estudou-se a aplicação dos métodos indicados no artigo *“Postprocessing Method for Dynamic Modulus Tests of Hot-Mix Asphalt”* de Liu et al. (2010), que tem como base os procedimentos recomendados no estudo *NCHRP Project 9-29*. Foram definidos três procedimentos, com base em diferentes expressões de ajuste ao par acção-reacção, e determinadas as equações de ajuste aos dados laboratoriais. Posteriormente calcularam-se os valores para os módulos de rigidez e ângulos de fase para cada procedimento.

Para verificar a validade do ajuste aos dados foi realizada uma análise estatística para comparar os resultados provenientes dos diferentes procedimentos.

Palavras Chave:

Misturas Betuminosas
Mastique Betuminoso
Módulo de Rigidez
Ângulo de Fase
Coeficiente de Correlação

Abstract

The work presented in this dissertation was focused on the study of the adjustment of equations to data series resulting from lab tests to determinate the stiffness modulus and phase angles of bituminous mixtures. Throughout the task the data supplied by PhD. Hugo Silva in his doctoral thesis "*Caracterização do Mastique Betuminoso e da Ligação Agregado-Mastique – Contribuição para o Estudo do Comportamento das Misturas Betuminosas*" was analyzed, using different adjustment procedures, based on the equations presented by Liu et al (2010) and verifying each obtained equation statistically according to the given data.

Bituminous mastics and mixtures in service behaviour depend of their composition. Different mastics and mixtures were characterized mechanically in laboratory with direct tension-compression tests imposing a sinusoidal load in accordance to the EN 12697-26 "*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 26: Stiffness*" (Silva, H., 2005).

To study the adjustment method expressions in this task, the method described in the paper "*Postprocessing Method for Dynamic Modulus Tests of Hot-Mix Asphalt*" by Liu et al. (2010) was followed, which is based on the NCHRP Project 9-29 recommended procedures. Three procedures were defined based on the different proposed equations to fit the laboratorial data. Then values for dynamic modulus and phase angle were calculated for each one of the three defined procedures.

Statistical analysis was done with the intention of evaluating the approximation of the obtained equations for the provided data, in order to compare the different procedures that were defined.

Keywords:

Bituminous Mixtures
Bituminous Mastic
Dynamic Modulus
Phase Angle
Correlation Factor

Índice

Capítulo 1	Introdução	1
1.1	Enquadramento Temático.....	1
1.2	Objectivos e Fases do Trabalho.....	3
1.3	Conteúdo da Dissertação	3
Capítulo 2	Descrição do “Problema” / Ensaio	5
2.1	Introdução	5
2.2	Pavimentos Rodoviários	5
2.3	Definição de Mistura Betuminosa e Mastique Betuminoso	7
2.4	Módulo de Rigidez e Ângulo de Fase das Misturas Betuminosas	13
2.5	Procedimentos de Ensaio	14
2.6	Ensaio Axial de Compressão Repetida em Estudo	22
Capítulo 3	Programa Experimental.....	25
3.1	Introdução	25
3.2	Características dos Provetes em Estudo	25
3.3	Caracterização Comportamento Mecânico das Misturas	28
3.4	Dados Utilizados	31
Capítulo 4	Análise dos Dados.....	35
4.1	Introdução	35
4.2	Artigo em Estudo	35
4.3	Método de Regressão e Análise do Qualidade do Ajuste	39
4.4	Definição dos Procedimentos.....	40
4.5	Resultados Obtidos e Comparação	42
4.6	Conclusões.....	63
Capítulo 5	Conclusões.....	65
5.1	Síntese do Trabalho e Conclusões.....	65
5.2	Desenvolvimentos Futuros.....	66
	Referências Bibliográficas	67
	Anexo A – Resultados Obtidos para os Mastiques Betuminosos.....	69
	Anexo B – Resultados Obtidos para as Misturas Betuminosas	87

Índice de Quadros

Quadro 3.1 – Composição dos provetes de mistura betuminosa (Silva, H, 2005).....	26
Quadro 3.2 – Composição dos provetes de mastique betuminoso (Silva, H, 2005).....	27
Quadro 3.3 – Fracções utilizadas na composição dos mastiques (Silva, H, 2005)	28
Quadro 3.4 – Número de ciclos por frequência dos mastiques betuminosos.....	31
Quadro 3.5 – Número de ciclos por frequência das misturas betuminosas.....	32
Quadro 3.6 – Exemplo de lista de dados fornecidos.....	33
Quadro 4.1 – Média do R^2 por frequência para as tensões dos mastiques betuminosos	43
Quadro 4.2 – Média do R^2 por frequência para as extensões dos mastiques betuminosos	43
Quadro 4.3 – Média R^2 em função da temperatura para as tensões dos mastiques betuminosos	43
Quadro 4.4 – Média do R^2 em função da temperatura para as extensões do mastique betuminoso ..	44
Quadro 4.5 – Média total do R^2 para a tensão dos mastiques betuminosos.....	44
Quadro 4.6 – Média total do R^2 para a extensão dos mastiques betuminosos	44
Quadro 4.7 – Média do R^2 por frequência para as tensões das misturas betuminosas	49
Quadro 4.8 – Média do R^2 por frequência para as extensões das misturas betuminosas	49
Quadro 4.9 – Média R^2 em função da temperatura para as tensões das misturas betuminosas.....	49
Quadro 4.10 – Média R^2 em função da temperatura para as extensões das misturas betuminosas...	50
Quadro 4.11 – Média total do R^2 das tensões dos mastiques betuminosos	50
Quadro 4.12 – Média total do R^2 das extensões dos mastiques betuminosos.....	50
Quadro 4.13 – Exemplo da influência do número de ciclos no ajustamento de dados.....	55
Quadro A.1 – Resultados módulo de rigidez e ângulo de fase dos mastique betuminosos	71
Quadro B.1 – Resultados módulo de rigidez e ângulo de fase das misturas betuminosas.....	89

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Constituição tipo dum pavimento rodoviário flexível (Silva, H., 2005)	6
Figura 2.2 – Acções e solicitações no pavimento rodoviário (Silva, H., 2005)	7
Figura 2.3 – Composição volumétrica de uma mistura betuminosa (Silva, H., 2005)	8
Figura 2.4 – Representação esquemática da relação entre as diferentes massas volúmicas do material granular de uma mistura betuminosa (Capitão, 1996)	9
Figura 2.5 – Comparação resultados de diferentes tipos de ensaios (Carbonneau et al., 2009)	15
Figura 2.6- Esquema do Teste de Tracção/Compressão Directa (EN 12697-26)	17
Figura 2.7 - Esquema do Teste de Módulo de Rigidez (NCHRP Project 9-29)	19
Figura 2.8 – Esquema Genérico de Dados de um Teste de Módulo de Rigidez (NCHRP Project 9-29). 19	
Figura 2.9 – Configuração do Ensaio de Compressão (Silva, H, 2005)	23
Figura 3.1 – Módulo de rigidez dos diversos mastiques a 20 °C (Silva, H, 2005)	29
Figura 3.2 – Ângulo de fase dos diversos mastiques a 20 °C (Silva, H, 2005)	29
Figura 3.3 – Módulo de rigidez das diversas misturas betuminosas a 20 °C (Silva, H, 2005)	30
Figura 3.4 – Ângulo de fase das diversas misturas betuminosas a 20 °C (Silva, H, 2005)	30
Figura 4.1 – Erros padrão do <i>Prostress #1</i> vs <i>Prostress #1</i> (Liu et al, 2010)	38
Figura 4.2 – Erros padrão do <i>Prostrain #1e #2</i> vs <i>Prostrain #3</i> (a) e <i>Prostrain #</i> vs <i>Prostrain #2</i> (b)	38
Figura 4.3 – Comparação valores de módulo de rigidez e ângulo de fase para baixas frequências e temperaturas altas - (a) e (c) e frequências altas e baixas temperaturas – (b) e (d)	39
Figura 4.4 – Exemplo de ajuste de uma equação obtida aos dados em estudo	42
Figura 4.5 – Gráfico da média do R^2 para a tensão do mastic betuminoso em função da frequência	45
Figura 4.6 – Gráfico da média do R^2 para a extensão do mastic betuminoso em função da frequência	45
Figura 4.7 – Gráfico do R^2 em função da temperatura para a tensão do mastic betuminoso	46
Figura 4.8 – Gráfico do R^2 em função da temperatura para a extensão do mastic betuminoso	46
Figura 4.9 – Gráfico de igualdade da média do R^2 para a tensão do mastic betuminoso em função da frequência.....	47
Figura 4.10 – Gráfico de igualdade da média do R^2 para a extensão do mastic betuminoso em função da frequência para comparação entre o Procedimento 1 e o Procedimento 2	47
Figura 4.11 – Gráfico de igualdade da média do R^2 para a extensão do mastic betuminoso em função da frequência para comparação entre o Procedimento 1 e o Procedimento 3	48

Figura 4.12 – Gráfico de igualdade da média do R^2 para a extensão do mastic betuminoso em função da frequência para comparação entre o Procedimento 1 e o Procedimento 3	48
Figura 4.13 – Gráfico da média do R^2 para a tensão da mistura betuminosa em função da frequência	51
Figura 4.14 – Gráfico da média do R^2 para a extensão da mistura betuminosa em função da frequência	51
Figura 4.15 – Gráfico do R^2 em função da temperatura para a tensão da mistura betuminosa	52
Figura 4.16 – Gráfico do R^2 em função da temperatura para a extensão da mistura betuminosa	52
Figura 4.17 – Gráfico de igualdade da média do R^2 para a tensão da mistura betuminosa em função da frequência.....	53
Figura 4.18 – Gráfico de igualdade da média do R^2 para a extensão da mistura betuminosa em função da frequência para comparação entre o Procedimento 1 e o Procedimento 2	53
Figura 4.19 – Gráfico de igualdade da média do R^2 para a extensão da mistura betuminosa em função da frequência para comparação entre o Procedimento 1 e o Procedimento 3	54
Figura 4.20 – Gráfico de igualdade da média do R^2 para a extensão da mistura betuminosa em função da frequência para comparação entre o Procedimento 2 e o Procedimento 3	54
Figura 4.21 – Gráfico de igualdade entre análise dos dados completos e intervalo de dados para o módulo de rigidez.....	55
Figura 4.22 – Gráfico de igualdade entre análise dos dados completos e intervalo de dados para o ângulo de fase	56
Figura 4.23 – Gráfico de igualdade para o módulo de rigidez da mastic betuminoso para comparação entre o Procedimento 1 e o Procedimento 2.....	57
Figura 4.24 – Gráfico de igualdade para o módulo de rigidez da mastic betuminoso para comparação entre o Procedimento 1 e o Procedimento 3.....	57
Figura 4.25 – Gráfico de igualdade para o módulo de rigidez da mastic betuminoso para comparação entre o Procedimento 2 e o Procedimento 3.....	58
Figura 4.26 – Gráfico de igualdade para o ângulo de fase da mastic betuminoso para comparação entre o Procedimento 1 e o Procedimento 2.....	59
Figura 4.27 – Gráfico de igualdade para o ângulo de fase da mastic betuminoso para comparação entre o Procedimento 1 e o Procedimento 3.....	59
Figura 4.28 – Gráfico de igualdade para o ângulo de fase da mastic betuminoso para comparação entre o Procedimento 2 e o Procedimento 3.....	60
Figura 4.29 – Gráfico de igualdade para o módulo de rigidez da mistura betuminosa para comparação entre o Procedimento 1 e o Procedimento 2.....	60

Figura 4.30 – Gráfico de igualdade para o módulo de rigidez da mistura betuminosa para comparação entre o Procedimento 1 e o Procedimento 3.....	61
Figura 4.31 – Gráfico de igualdade para o módulo de rigidez da mistura betuminosa para comparação entre o Procedimento 2 e o Procedimento 3.....	61
Figura 4.32 – Gráfico de igualdade para o ângulo de fase da mistura betuminosa para comparação entre o Procedimento 1 e o Procedimento 2.....	62
Figura 4.33 – Gráfico de igualdade para o ângulo de fase da mistura betuminosa para comparação entre o Procedimento 1 e o Procedimento 3.....	62
Figura 4.34 – Gráfico de igualdade para o ângulo de fase da mistura betuminosa para comparação entre o Procedimento 2 e o Procedimento 3.....	63

Simbologia

ε	- Nível de extensão
σ	- Nível de tensão
φ	- Ângulo de fase
σ_t	- Tensão de compressão e de tracção no plano horizontal
σ_z	- Tensão de compressão no plano vertical
E	- Módulo de rigidez
E^*	- Módulo complexo
$ E^* $	- Valor absoluto do módulo complexo
E_1	- Parte real do módulo complexo
E_2	- Parte imaginária do módulo complexo
R^2	- Coeficiente de Correlação
t	- Tempo de carregamento

Lista de Abreviaturas

EN	- Norma europeia (<i>Europäische Norm</i>)
NCHRP	- <i>National Cooperative Highway Research Program</i>
SPT	- <i>Simple Performance Test</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento Temático

Os modelos convencionais para prever a respostas dos materiais betuminosos dos pavimentos rodoviários flexíveis baseiam-se na teoria da elasticidade linear e no carregamento estático, no entanto estes modelos só prevêm adequadamente a resposta do pavimento rodoviário flexível a baixas temperaturas e a elevadas velocidades de circulação.

Contudo desde a década de sessenta que o módulo de rigidez vem sendo estudado utilizando carregamentos sinusoidais sobre provetes, sendo os testes conduzidos a temperaturas controladas e a variadas frequências de carregamento de modo a ter em conta a viscoelasticidade das misturas betuminosas. A importância de se considerar a viscoelasticidade do material e de se ter em conta o efeito da temperatura e frequência de carregamento, permite que o ensaio do módulo de rigidez possibilite determinar tanto as características elásticas como as características viscoelásticas lineares das misturas betuminosas (Christensen, 1982).

Na década de setenta realizaram-se testes com diferentes formas de carregamento, concluindo-se que era no ângulo de fase que se encontravam maiores diferenças (Bonnaure et al., 1977) e que os ensaios de compressão/tracção são os que fornecem resultados mais próximos do comportamento de um pavimento rodoviário flexível em utilização (Witczack and Root, 1974).

A metodologia de pós-processamento de ensaios de rigidez em misturas betuminosas é actualmente dada pelo estudo americano *NCHRP Project 9-29* referente ao ensaio SPT (Simple Performance Test) e pela norma europeia *EN 12697-26 Misturas Betuminosas – Métodos de teste para misturas betuminosas a quente – Parte 26: Rigidez*, onde são descritos os procedimentos para execução dos ensaios e o modo de tratamento de dados de modo a determinar o valor do módulo de rigidez e do ângulo de fase. Em ambas as normas o princípio do teste consiste em submeter os provetes a uma carga sinusoidal impondo uma dada temperatura e frequência.

O estudo americano *NCHRP Project 9-29* especifica as características que o equipamento deverá ter para a realização do ensaio de módulo de rigidez dinâmico, sendo que também se encontra especificado os procedimentos de como deverão ocorrer os ensaios e o respectivo tratamento de dados para calcular os valores do módulo de rigidez e

do ângulo de fase. Este ensaio especifica como chegar a uma equação de aproximação aos dados através de uma regressão pelos mínimos quadrados.

Para a determinação do módulo de rigidez e do ângulo de fase, a norma europeia *EN 12697-26* especifica os métodos e as condições para o ensaio a realizar, assim como também define as equações necessárias para o cálculo das grandezas em estudo usando os dados obtidos no ensaio. O facto de muitos países da união europeia que já têm laboratórios equipados com máquinas específicas e especificações próprias para um determinado teste, leva a que nesta norma sejam descritos cinco diferentes testes em vez de ter sido feito uma standardização que culminasse num único método de teste para a determinação do módulo de rigidez. Tal facto não aconteceu devido à dificuldade dos países em abandonar os métodos e as experiências que utilizam e também ao facto de ter substituir o equipamento de teste e todas as ferramentas de laboratório que não se adequassem ao novo teste, resultando em grandes custos difíceis de suportar.

Devido ao facto dos diferentes tipos de teste surgiram estudos com o intuito de correlacionar os resultados dos testes e de estimar quanto um resultado pode variar utilizando diferentes tipos de testes. Esses estudos demonstraram que existem diferenças significativas nos resultados que podem ser obtidos através dos diferentes tipos de testes referidos na norma europeia e também do teste de SPT da norma americana. Devido à divergência entre os diferentes testes torna-se necessário que se especifique o teste utilizado, e em que condições foram efectuados de modo a que seja conhecido o tipo de módulo da mistura betuminosa.

O estudo da reprodutibilidade e repetibilidade tem alguma importância na determinação da rigidez das misturas betuminosas, pois é necessário que o mesmo teste realizado nas mesmas condições possa fornecer resultados semelhantes tanto em diferentes laboratórios como na repetição do teste no mesmo laboratório. Estudos efectuados por testes inter-laboratoriais concluíram que se tem uma boa reprodutibilidade e a repetibilidade nos testes efectuados, desde que respeite algumas condições de modo a evitar fontes de erros (Di Benedetto et al., 2001).

O módulo de rigidez e o ângulo de fase são influenciados pela composição e características da mistura betuminosa, podendo variar também com a temperatura e o tipo de carregamento. Tendo isso em conta, também este factor influencia o teste utilizado e a sua reprodutibilidade e repetibilidade, sendo necessário que seja conhecida a composição da mistura betuminosa em estudo.

Para caracterizar uma mistura betuminosa é preciso conhecer o mastique betuminoso e os agregados que a constituem, só assim se pode conhecer grandezas como o módulo de rigidez e o ângulo de fase.

1.2 Objectivos e Fases do Trabalho

O objectivo do presente trabalho passa por analisar as metodologias de pós-processamento de ensaios de determinação do módulo de rigidez e ângulo de fase em provetes de misturas betuminosas e mastiques betuminosos apresentados por Liu et al. (2010), de modo a determinar os valores do seu módulo de rigidez e de ângulo de fase partindo de valores de ensaios axiais de compressão/tracção repetida sobre os provetes fornecidos pelo Prof. Hugo Silva.

Numa primeira fase do trabalho procedeu-se a uma análise dos dados fornecidos fazendo os cálculos necessários para obter as equações em tensões e extensões, e com base nas diferentes equações de ajuste de dados presentes no artigo *“Postprocessing Method for Dynamic Modulus Tests of Hot-Mix Asphalt”* de Liu et al. (2010) definiram-se três procedimentos e compararam-se os resultados obtidos.

Seguidamente fez-se um estudo estatístico do ajuste das equações obtidas aos dados fornecidos através do factor de correlação e da raiz quadrada da média da soma do quadrado dos resíduos, para aferir da qualidade do ajustamento obtido e para perceber qual dos procedimentos fornece um ajustamento com maior qualidade.

Com as constantes provenientes das equações de ajuste, procede-se então ao cálculo do módulo de rigidez e do ângulo de fase de acordo com a formulação presente no artigo em estudo.

Finalmente faz-se uma análise dos valores obtidos comparando os valores obtidos e fazendo uma análise entre os diferentes procedimentos utilizados de modo a poder aferir e concluir acerca das diferenças entre eles.

1.3 Conteúdo da Dissertação

Tendo em vista a concretização dos objectivos propostos a dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos.

No Capítulo 1 – “Introdução” é feito um enquadramento temático do trabalho, fazendo-se uma pequena introdução aos documentos normativos utilizados no presente trabalho, assim como uma breve definição de mistura betuminosa e mástico betuminoso, é também feita uma abordagem aos conceitos de módulo de elasticidade e de ângulo de fase. Em seguida descrevem-se os objectivos e fases do trabalho, e finalmente numa terceira parte onde se indica a organização desta dissertação.

No Capítulo 2 – “Descrição do “Problema”/Ensaio” tem-se numa primeira parte a definição e caracterização de mistura betuminosa e mástico betuminoso para o trabalho em estudo. Seguindo-se a exposição das metodologias das normas estudadas e das

metodologias adoptadas no ensaio experimental que deu origem aos dados em estudo neste trabalho.

No Capítulo 3 – “Dados em Estudo” é realizada uma descrição dos dados fornecidos, dos tipos de provetes e condições utilizadas para a obtenção desses dados.

No Capítulo 4 – “Análise e Tratamento dos Dados” é explicada a metodologia em que foi baseado este trabalho, sendo feita a definição dos procedimentos adoptados para o tratamento de dados e descrevendo os métodos estatísticos utilizados. De seguida são apresentados os resultados obtidos, analisando a qualidade do ajuste de cada procedimento e concluindo com a comparação dos dados obtidos entre os três procedimentos definidos

No capítulo 5 – “Conclusões” sintetizam-se os conceitos abordados ao longo do presente trabalho e referem-se as conclusões mais relevantes retiradas do trabalho desenvolvido.

Capítulo 2

Descrição do “Problema” / Ensaio

2.1 Introdução

O módulo de rigidez e o ângulo de fase são características que permitem avaliar as misturas betuminosas. As misturas betuminosas são um dos principais constituintes dos pavimentos rodoviários, e por essa razão que na primeira secção deste capítulo se aborda e define esses mesmos pavimentos e de que forma o tráfego rodoviário e as condições climáticas o influenciam e às misturas betuminosas que o constituem.

Na secção seguinte apresenta-se a definição do mastique betuminoso e da mistura betuminosa que foi adoptada neste trabalho, assim como se apresenta a sua composição e de que forma influencia as suas características.

De seguida apresenta-se uma secção onde se define o módulo de rigidez e o ângulo de fase, de que modo podem ser calculados e de que factores ambas as características estão dependentes.

Para se chegar ao valor do módulo de rigidez e ângulo de fase existem normas nas quais se definem procedimentos para a execução de ensaios em misturas betuminosas e tratamentos dos dados, as normas estudadas neste trabalho são definidas na secção 5 do presente capítulo.

Finalmente na última secção deste capítulo é apresentado o ensaio que originou os valores que permitiram o estudo presente neste trabalho.

2.2 Pavimentos Rodoviários

Os pavimentos rodoviários são estruturas niveladas de materiais mais resistentes que o terreno natural, formadas por várias camadas de espessura finita apoiada na fundação constituída pelo terreno natural, sendo capazes de suportar acções dos agentes atmosféricos e as cargas do tráfego durante um determinado período de vida desse pavimento. As diferentes camadas normalmente dispõem-se de cima para baixo com qualidade e resistência decrescente.

Um pavimento deve apresentar qualidade funcional assegurando o conforto e a segurança dos utentes que nele passam, e deve apresentar também qualidade estrutural, suportando as cargas dos veículos sem sofrer alterações para além do valor limite.

Pode-se ter pavimentos rodoviários rígidos, flexíveis e ainda pavimentos semi-rígidos, sendo que no primeiro caso se utiliza produtos à base do cimento e no último uma combinação entre os pavimentos rígidos e flexíveis. Apenas se vai definir o pavimento rodoviário flexível, que é constituído por misturas betuminosas nas suas camadas superiores e é maioritariamente utilizado na rede rodoviária portuguesa e em todos os países da união europeia.

O pavimento rodoviário flexível é constituído por um conjunto de camadas superiores e por um conjunto de camadas inferiores que assentam na fundação (Figura 2.1). As camadas superiores são compostas por misturas betuminosas, sendo normalmente formadas por uma camada de desgaste, uma camada de ligação e uma camada base. As camadas inferiores são realizadas com material granular, dividindo-se normalmente em base granular e sub-base granular (Silva, H., 2005).

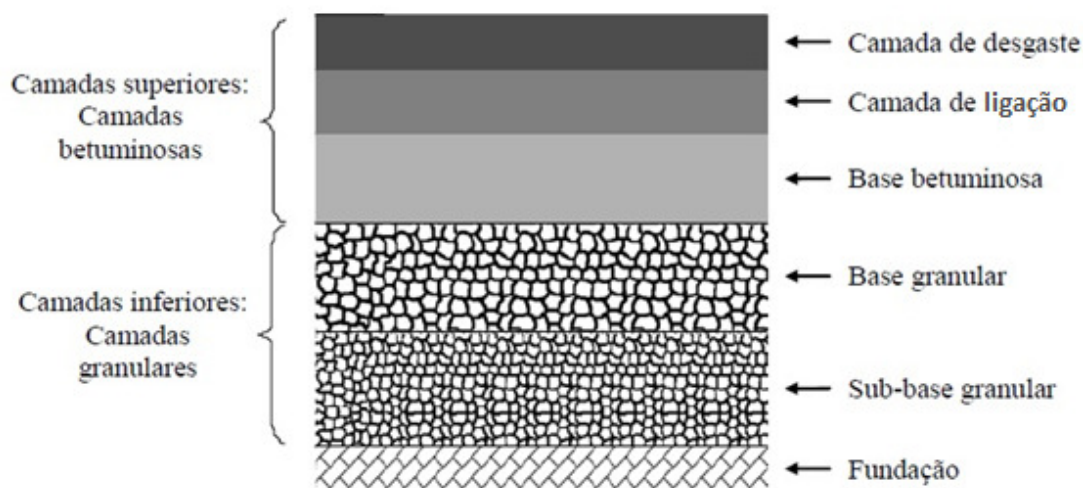


Figura 2.1 – Constituição tipo dum pavimento rodoviário flexível (Silva, H., 2005)

Nas camadas superiores, a camada de desgaste tem a função de resistir à acção directa do tráfego, devendo ser suficientemente uniforme de forma a proporcionar uma circulação com conforto e segurança, apresentando uma certa rugosidade de modo a garantir a aderência pneu-pavimento e deve proteger as camadas inferiores das acções climáticas assegurando uma rápida eliminação da água no pavimento. A camada de ligação para além de servir como base regular onde a camada de desgaste assenta, também contribui para a resistência global da estrutura. A base betuminosa basicamente contribui para a função estrutural.

Nas camadas inferiores a camada de base granular tem função estrutural, absorvendo a maior parte dos esforços verticais provocados pela passagem dos veículos. A camada de sub-base granular serve como ligação entre o pavimento rodoviário e a

fundação, e tem como função reduzir as tensões de compressão sob a fundação, podendo também ter uma função drenante.

Os pavimentos rodoviários estão sujeitos à solicitação do tráfego e à solicitação dos agentes climáticos (Figura 2.2). A solicitação do tráfego consiste numa acção vertical repetida que resulta em esforços de compressão e tracção devido à flexão, numa acção tangencial resultante da interacção entre os pneus e o pavimento e esforços de corte. A solicitação dos agentes climáticos resulta em deformações permanentes e fendilhamento no pavimento.

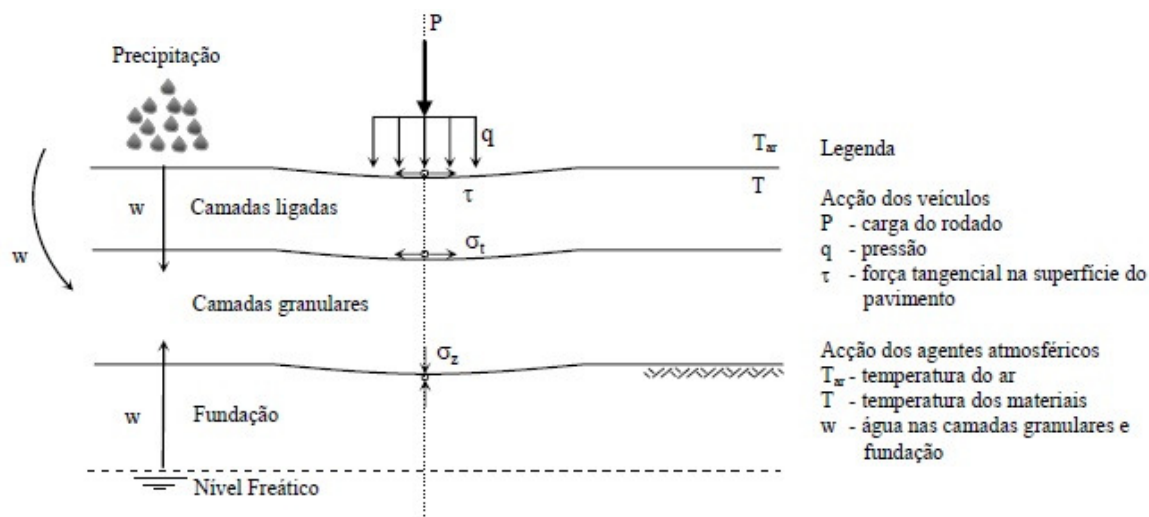


Figura 2.2 – Acções e solicitações no pavimento rodoviário (Silva, H., 2005)

Nas camadas betuminosas do pavimento rodoviário estão sujeitas a esforços de flexão, tracção, esforços tangenciais na camada de desgaste, contracções e expansões térmicas, esforços de corte e de compressão. Como o comportamento das misturas betuminosas depende das características do material que o constitui, é necessário saber qual a formulação da mistura betuminosa que permite uma optimização da mistura betuminosa quando sujeita aos esforços acima mencionados.

Assim pode dizer-se que a degradação dos pavimentos rodoviários flexíveis é um processo que resulta da evolução natural do mesmo, mas uma correcta formulação e produção das misturas betuminosas e se juntamente com isso existir uma correcta concepção do pavimento, garantem uma boa qualidade estrutural e funcional para o pavimento ao longo do período de vida projectado para o mesmo.

2.3 Definição de Mistura Betuminosa e Mastique Betuminoso

Neste trabalho é necessário definir tanto as misturas betuminosas como o mastique betuminoso, assim como perceber como as suas características são influenciadas pelas qualidades do tipo de material que os constituem. Com isso pode-se entender como cada

tipo de formulação de mistura betuminosas deve ser feita de modo a ir ao encontro das necessidades que cada tipo de pavimento está sujeito.

Seja a que tipo de pavimento as misturas betuminosas se destinem, elas devem apresentar características como estabilidade, durabilidade, flexibilidade, resistência à fadiga, aderência, impermeabilidade e trabalhabilidade (Branco, Pereira e Picado Santos, 2008). A estabilidade caracteriza a capacidade da mistura betuminosa resistir com pequenas deformações às solicitações em serviço. A durabilidade qualifica a resistência da mistura em relação aos danos provocados pela acção do tráfego e dos agentes atmosféricos ao longo do tempo. A flexibilidade de uma mistura betuminosa revela a capacidade desta de se adaptar aos movimentos do suporte sem sofrer fendilhamento. A resistência à fadiga corresponde à capacidade do pavimento resistir à repetida passagem do tráfego sem que ocorra abertura de fendas. A aderência é capacidade dos pneus dos veículos aderirem ao pavimento, mesmo com este molhado. A impermeabilidade de uma mistura betuminosa deve ser tal de modo a oferecer elevada resistência à passagem de água através de si. Por fim, a trabalhabilidade caracteriza a mistura betuminosa relativamente à sua colocação e compactação com facilidade.

As misturas betuminosas são principalmente compostas pelo ligante betuminoso, por agregados e por um volume de vazios, pois existe sempre uma percentagem da mistura betuminosa ocupada por ar (Figura 2.3 e 2.4). Podem ser acrescentados aditivos às misturas betuminosas com vista à melhoria de certas características das misturas betuminosas sem alterar a sua composição, como por exemplo melhorar a resistência ao fendilhamento, melhorar a adesividade, ou diminuir a susceptibilidade térmica.

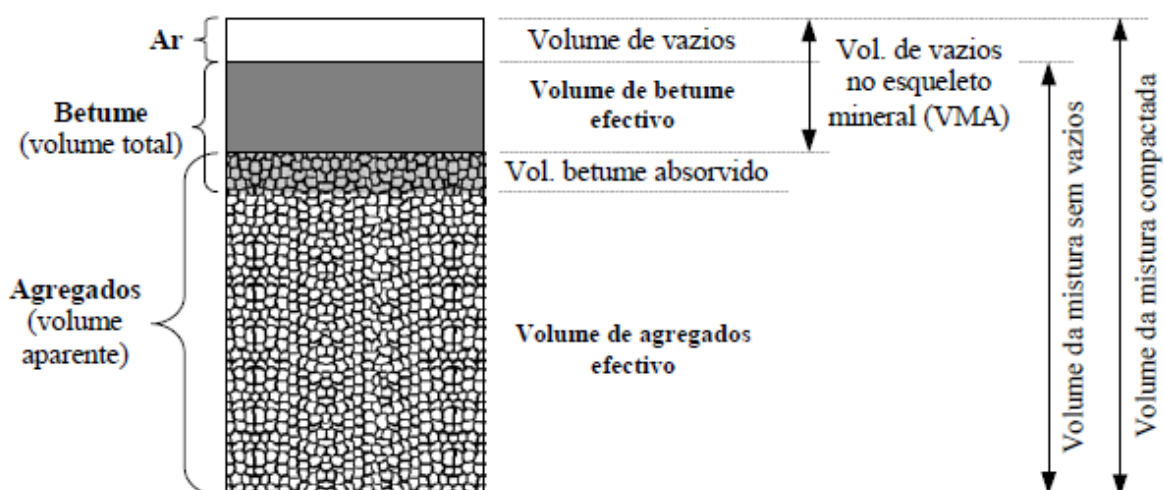


Figura 2.3 – Composição volumétrica de uma mistura betuminosa (Silva, H., 2005)

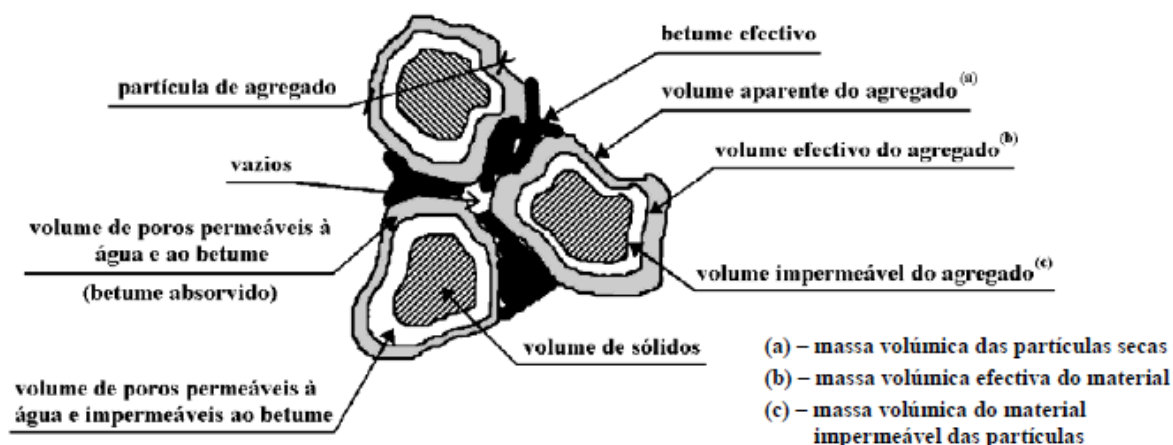


Figura 2.4 – Representação esquemática da relação entre as diferentes massas volúmicas do material granular de uma mistura betuminosa (Capitão, 1996)

Cada um dos componentes referidos acima vai desempenhar determinadas funções. Os agregados constituintes das misturas betuminosas são normalmente na ordem de 90 a 95% do peso da mistura betuminosa e 75 a 85% do seu volume (Branco, Pereira e Picado Santos, 2005). Os agregados têm diferentes dimensões, podendo ser agregados grossos, finos e filer (material passado no peneiro #200), e vão desempenhar diferentes funções em função das suas dimensões.

Os agregados grossos têm funções como garantir a estabilidade da mistura betuminosa (resistência às deformações permanentes), aumentar a resistência mecânica da mistura betuminosa (aumento do módulo de rigidez), e também assegurar uma suficiente rugosidade superficial para a circulação de veículos (aderência pneu-pavimento).

Os agregados finos (dimensões inferiores a 2 mm) conferem estabilidade e compacidade às misturas betuminosas adquiram.

O filer é o material que fornece à mistura betuminosa características como a compacidade e a impermeabilidade. A utilização de diferentes tipos de filer com diferentes características físicas e químicas em misturas betuminosas tem influência no comportamento desta.

Os agregados utilizados nas misturas betuminosas não devem ser muito porosos, pois resulta num aumento de quantidade total de betume necessária para produzir a mistura, e não devem ser também totalmente impermeáveis, porque isso resultará numa menor adesividade do betume aos agregados (Silva, H., 2005).

Numa mistura betuminosa o volume de vazios influencia também as suas características. Com um volume de vazios elevado resulta numa maior permeabilidade, menor resistência às deformações permanentes e menor durabilidade da mistura. As excepções a este último caso são as misturas betuminosas porosas e drenantes, que por via de adição de aditivos e técnicas construtivas anulam os efeitos nefastos do elevado

volume de vazios. No entanto, o volume de vazios não deve ser inferior a 3%, pois abaixo desse valor podem ocorrer problemas de estabilidade da mistura betuminosa, havendo uma maior propensão para a ocorrência de deformações permanentes e para a exsudação do ligante betuminoso.

Uma parte do volume de vazios vai ser ocupada pelo ligante betuminoso, havendo também uma parte do ligante que será absorvido pelos agregados, dependendo essa quantidade da porosidade dos agregados utilizados.

O ligante mais utilizado nos pavimentos rodoviários é o betume asfáltico, sendo um produto com boa qualidade adesiva e tendo uma consistência que varia com a temperatura (Branco, Pereira e Picado Santos, 2008). Os betumes asfálticos, além de dependerem da temperatura, também dependem do tempo de carregamento a que será solicitado, sendo assim necessário conhecer as suas características de modo a ser possível prever o seu comportamento.

O ligante betuminoso, vai desempenhar várias funções na mistura betuminosa. Na estabilidade vai oferecer coesão com o aumento da sua quantidade, mas apenas até valor, a partir do qual começa a decrescer. O ligante betuminoso influencia também a durabilidade da mistura, sendo que, em geral, a durabilidade será maior com o aumento da quantidade de ligante. Também a flexibilidade e a resistência à fadiga melhoram com o aumento da quantidade de ligante betuminoso. O ligante betuminoso assegura ainda uma boa impermeabilidade do pavimento e permite uma boa trabalhabilidade da mistura betuminosa.

Devido a todos estes constituintes mencionados, para que a mistura betuminosa tenha um apropriado desempenho em serviço, é necessário estudar em pormenor a sua composição volumétrica. Para tal, a determinação da relação entre as diversas fracções dos agregados (curva granulométrica), o teor de betume e o volume de vazios é necessário para garantir um comportamento adequado da mistura betuminosa.

Um aumento do teor em betume afecta a mistura betuminosa, aumentando a resistência ao fendilhamento, a trabalhabilidade, a impermeabilidade e a durabilidade. Em contrapartida, esse aumento vai diminuir a resistência às deformações permanentes e também a aderência pneu-pavimento.

A granulometria influencia todas as características de comportamento da mistura betuminosa, sendo que a mistura que permite obter as melhores características de comportamento para a mistura betuminosa será uma mistura adequada de elementos finos, médios e grossos, com uma densidade elevada.

Pode-se dizer então que as características de cada um dos componentes elementares que compõem a mistura betuminosa, vai influenciar o modo como se comporta. Logo, uma caracterização correcta dos agregados e ligante betuminoso é necessária, para

que o desempenho da mistura betuminosa não seja comprometido devido ao comportamento inadequado dos seus constituintes.

A mistura betuminosa é habitualmente caracterizada mecanicamente pelo módulo de rigidez e o coeficiente de Poisson, e dado o seu comportamento viscoelástico é importante também conhecer o seu ângulo de fase.

O comportamento reológico das misturas betuminosas nos pavimentos, influenciado sobretudo pela presença do betume, depende essencialmente da temperatura e da frequência de aplicação das cargas. Para deformações elevadas, correspondentes a temperaturas e tempos de carga elevadas, as misturas betuminosas exibem comportamento viscoso. Por sua vez, no domínio das pequenas deformações, característico de temperaturas e tempos de carga baixos, as misturas betuminosas têm comportamento elástico. Para condições intermédias, estes materiais evidenciam comportamento do tipo viscoelástico.

Também a composição das misturas betuminosas vai influenciar o valor do módulo de rigidez. Quando se utilizam betumes mais duros o módulo de rigidez vai aumentar, o mesmo acontece quando se diminui o volume de vazios. O aumento do teor de betume e filer também resulta num aumento do módulo de rigidez, mas apenas até determinado valor limite, a partir do qual se dá uma redução do módulo. A temperaturas baixas a granulometria não exerce grande impacto no valor do módulo de rigidez, mas consoante aumenta a temperatura também a sua influência no valor do módulo aumenta.

A definição de mastique betuminoso utilizada neste trabalho é a de que se considera como uma mistura de filer e agregados finos e betume que envolve e aglomera os agregados grossos das misturas betuminosas, preenche os vazios existentes no esqueleto mineral garantindo compacidade, assegura a impermeabilidade e trabalhabilidade das misturas betuminosas (Silva, H., 2005)

Esta definição de mastique foi a usada para que fosse possível produzir mastiques betuminosos em laboratório com coesão suficiente para serem submetidos a ensaios mecânicos, de onde resultaram os dados referentes a este trabalho, permitindo a comparação do comportamento do mastique e das misturas betuminosas.

O estudo do mastique torna-se importante visto que uma boa qualidade do mastique, assim como uma boa interacção entre o mastique e os restantes componentes da mistura betuminosa, resultam numa melhoria nas propriedades mecânicas da mistura.

As propriedades do mastique são influenciadas pelas propriedades reológicas do betume e pela forma e estrutura do filer. O filer tem como função preencher os vazios entre os agregados mais grossos da mistura betuminosa, sendo importante conhecer a sua irregularidade geométrica, a sua textura superficial, porosidade e as suas propriedades físico-químicas.

O filer e os agregados finos actuam como aglutinante betuminoso, sendo necessário ter cuidado para que não haja um aumento acima do necessário da quantidade de aglutinante de modo a evitar deformações permanentes. Alguns agregados finos aumentam a sensibilidade da mistura betuminosa à água, além disso também alguns agregados finos têm uma acção considerável no endurecimento do betume.

O mastique betuminoso apresenta um aumento da sua viscosidade, da sua temperatura de amolecimento e ainda uma diminuição da sua ductilidade quando é utilizado um tipo de filer mais irregular geometricamente. A irregularidade do filer juntamente com a sua textura superficial e porosidade influencia a quantidade de betume adsorvido pelo mastique existente na mistura betuminosa, e a existência dessa adsorção significa um aumento do teor de betume na mistura betuminosa sem ganhos ao nível do comportamento mecânico, pelo que não se deve optar por tipos de filer com esse comportamento.

As propriedades físico-químicas do filer influenciam significativamente o comportamento do mastique e das misturas betuminosas, já que as propriedades químicas do filer são responsáveis pela intensidade específica da adsorção, e as propriedades físicas determinam a magnitude dessa adsorção.

Para obter um mastique que tenha um bom comportamento tanto a temperaturas elevadas como a temperaturas baixas a selecção adequada será a utilização de um filer mais “forte”. Um filer “forte” é aquele que garante um maior aumento de consistência do betume.

A ligação entre o mastique betuminoso e os agregados (ligação agregado-mastique) caracteriza-se através da sua resistência mecânica, dependendo da coesão interna do mastique e da interacção na interface entre o mastique e os agregados.

Esta ligação agregado-mastique pode ser afectada pelo envelhecimento do betume, resultando desse envelhecimento mudanças na composição química e reológica do betume. Devido às mudanças na composição do betume resultante do envelhecimento do ligante betuminoso, vai haver um aumento da viscosidade e polaridade, traduzindo-se num aumento do módulo de rigidez na mistura betuminosa, uma menor resistência ao fendilhamento térmico e uma ligação agregado-mastique mais sensível à presença de água, diminuindo assim a durabilidade da mistura.

Os ensaios de envelhecimento de betume e de misturas betuminosas, consistem no aquecimento destas numa estufa. O ensaio de envelhecimento da mistura betuminosa tem vantagem em relação ao envelhecimento do betume, pois tem em consideração a influência que os agregados têm no envelhecimento do betume.

2.4 Módulo de Rigidez e Ângulo de Fase das Misturas Betuminosas

Como já referido anteriormente, as misturas betuminosas utilizadas nos pavimentos rodoviários têm comportamento mecânico do tipo viscoelástico. Este comportamento é definido pelo módulo de rigidez e pelo ângulo de fase, estando estes parâmetros dependentes da temperatura e da frequência de aplicação das cargas. Estas duas características podem ajudar a prever de que modo uma mistura betuminosa presente num pavimento rodoviário em funcionamento se comporta.

O módulo de rigidez é definido como a relação entre as amplitudes das tensões aplicadas e das deformações medidas. O ângulo de fase é uma medida do desfaseamento entre as tensões e as deformações, permitindo apurar se o comportamento da mistura betuminosa é predominantemente elástico, quando o ângulo de fase é nulo, ou viscoso quando toma valores perto de 90° (Neves e Gomes Correia, 2006).

As tensões e extensões são dependentes do tempo de carregamento, da temperatura e da sua própria composição, e sendo assim pode-se dizer que ao módulo de rigidez depende do tipo de carregamento depende também do tempo e frequência desse carregamento e da temperatura.

A determinação do módulo de rigidez e do ângulo de fase é feita em ensaios laboratoriais com carregamentos axiais de carga repetida a temperatura constante em provetes geralmente prismáticos, em equipamento adequado, cuja variação temporal deve procurar reproduzir o melhor possível as condições de solicitação induzidas pela passagem do tráfego.

Pode-se assim ter de forma aproximada o modo como as misturas betuminosas respondem à solicitação das cargas (relação entre a tensão e extensão), assim como indicar como a temperatura e a velocidade de carregamento influenciam o seu comportamento (Branco, Pereira e Picado Santos, 2008).

A determinação destas propriedades pode ser feita independentemente dos diferentes tipos de ensaios que variam nas normas existentes, no entanto é necessário que os ensaios sejam bem executados e que exista uma uniformidade na geometria dos provetes nos diferentes tipos de ensaios, e tendo em conta que as condições usadas em ensaios de cargas repetidas é apenas válida no domínio das pequenas deformações (material com comportamento próximo do linear).

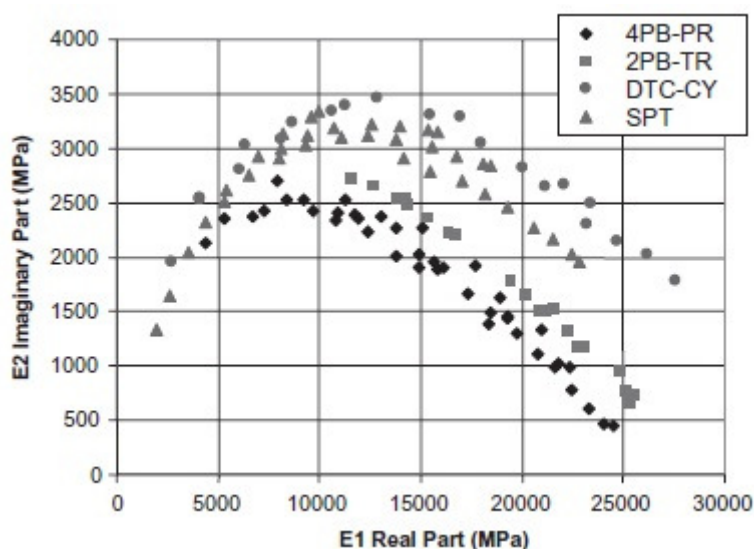
2.5 Procedimentos de Ensaio

A caracterização em laboratório do comportamento mecânico de misturas betuminosas aplicadas em pavimentos rodoviários baseia-se em ensaios realizados em provetes submetidos a cargas repetidas com variação sinusoidal no tempo, ou outro tipo de impulso, com tensão ou extensão imposta.

Para a determinação dessas características do comportamento mecânico existem vários procedimentos correntes e documentos como a norma europeia EN 12697-26 (Misturas betuminosas – Métodos de teste para asfalto de misturas betuminosas a quente) e o estudo americano NCHRP Project 9-29, que foram as normas alvo de estudo no presente trabalho.

A norma EN 12697-26 (Misturas betuminosas – Métodos de teste para misturas betuminosas a quente) especifica os métodos de determinação do módulo de rigidez e do correspondente ângulo de fase para misturas betuminosas utilizando diferentes tipos de ensaios onde varia o equipamento, o tipo de provete e o tipo de força aplicada. Este documento indica ensaios com o objectivo de prever o comportamento do pavimento rodoviário com base nas características de rigidez obtidas através dos diferentes tipos de ensaio utilizados. O facto de existirem diferentes tipos de ensaios definidos nesta norma prende-se com os diferentes tipos de equipamento utilizados em cada laboratório, e seria muito dispendioso para os laboratórios trocar de equipamento de ensaio, para além de que seria necessário técnicos especializados para operar o equipamento, no caso da norma impusesse apenas um tipo de equipamento (*Carbonneau et al.* 2009).

Como existem diferentes tipos de ensaio é necessário saber se os resultados obtidos através de diferentes ensaios para um mesmo tipo de mistura betuminosa se podem relacionar, e no estudo levado a cabo por *Carbonneau et al.*, que através da comparação de ensaios seguindo a normalização europeia para o mesmo tipo de mistura chegaram a conclusão que os resultados para a mesma mistura podem diferir e por isso é imperativo que ao atribuir o módulo de rigidez a um produto se especifique o método e as condições praticadas no ensaio. Apesar disso e com a ressalva de ainda se apresentarem umas equações iniciais próximas, é possível correlacionar o módulo de rigidez através dessas equações. Esse mesmo facto pode ser visto na figura 2.5 proveniente do estudo de *Carbonneau et al.*, onde é possível ver as diferenças obtidas por quatro ensaios com equipamentos diferentes.



Legenda:

4PB-PR – Teste de flexão em 4 pontos em provetes prismáticos;
 2PB-TR – Teste de flexão em 4 pontos em provetes trapezoidais;
 DTC-CY – Teste de tensão - compressão directa em provetes cilíndricos;
 SPT – Simple Performance Test's.

Figura 2.5 – Comparação resultados de diferentes tipos de ensaios (Carbonneau et al., 2009)

Em relação à reprodutibilidade para a determinação do módulo de rigidez e do ângulo de fase, deve ser sempre mencionado o ensaio utilizado para a sua determinação, pois se para o ângulo de fase se consegue uma boa reprodutibilidade independentemente do ensaio utilizado, para o módulo de rigidez isso não acontece e existem desvios significativos (Di Benedetto et al., 2001).

Já em relação à repetibilidade, o módulo de rigidez é um bom indicador das características mecânicas de uma mistura betuminosa, pois se o processo for feito de maneira cuidadosa o desvio dos valores pode atingir apenas um valor baixo de 5% (Di Benedetto et al., 2001).

O módulo de rigidez é definido como a relação entre a tensão (σ) e extensão (ε) para um material viscoelástico sujeito a ensaios cíclicos com carregamento sinusoidal durante um tempo t , onde aplicando uma tensão de $\sigma \times \sin(\omega \times t)$ resulta uma resposta dada por $\varepsilon \times \sin(\omega \times (t - \Phi))$ apresentando um respectivo ângulo de fase (Φ) em relação à tensão aplicada.

O quociente entre a tensão aplicada e a extensão define o módulo complexo (E^*) da mistura betuminosa de acordo com a seguinte equação:

$$E^* = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \times (\cos(\Phi) + i \times \sin(\Phi)) = |E^*| \times (\cos(\Phi) + i \times \sin(\Phi)) \quad (2.1)$$

Este módulo de rigidez é caracterizado por duas componentes, uma componente real e uma componente imaginária. A componente real (E_1) representa energia que se encontra armazenada no material, enquanto a componente imaginária (E_2) representa a energia

perdida por atrito no seio do material. Estas duas componentes podem ser definidas pelas seguintes equações:

$$E_1 = |E^*| \times \cos(\Phi) \quad (2.2)$$

$$E_2 = |E^*| \times \sin(\Phi) \quad (2.3)$$

O valor absoluto do módulo de rigidez e o seu ângulo de fase (Φ), podem ser determinadas de acordo com as seguintes equações:

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (2.4)$$

$$\Phi = \tan^{-1} \left(\frac{E_2}{E_1} \right) \quad (2.5)$$

Esta última caracterização é a forma mais corrente de apresentação das propriedades mecânicas de uma mistura betuminosa, considerando uma dada temperatura e uma dada frequência de aplicação das cargas.

A norma EN 12697-26 define como princípio do ensaio provetes sujeitos a cargas repetidas ou a tensões de deformação controlada, onde as amplitudes de tensão e extensão são medidas juntamente com a diferença de fase entre a tensão e extensão.

A amplitude e a frequência da carga aplicada devem ser monitorizadas pela força aplicada ou pela deformação apresentada, sendo que a amplitude não deve provocar danos no provete durante o tempo do ensaio e que a frequência deve ser capaz de cobrir uma variação entre os 0,1 Hz e os 50 Hz começando na frequência mais baixa e indo até à mais alta, fazendo no fim o ensaio à frequência mais baixa de modo a verificar se o provete não sofreu danos. A norma refere também que se os resultados em forma de onda harmónica apresentarem qualquer distorção isso pode significar perturbações nos resultados finais do módulo de rigidez e ângulo de fase.

Para além disto a norma diz que a temperatura da câmara de ensaio não deve exceder um limite de $\pm 0,5$ °C da temperatura especificada e que o provete se deve encontrar na câmara de ensaio à temperatura pretendida um mínimo de quatro horas antes da realização do ensaio.

A norma apresenta também as expressões relativas ao factor de forma e ao factor de massa para diferentes provetes e diferentes condições de carga que são utilizadas nas expressões seguintes:

$$E_1 = \gamma \times \left(\frac{F}{z} \times \cos(\Phi) + \frac{\mu}{10^3} \times \omega^2 \right) \quad (2.6)$$

$$E_2 = \gamma \times \left(\frac{F}{z} \times \sin(\Phi) \right) \quad (2.7)$$

Onde:

- F = Força Aplicada
- z = Deformação
- Φ = Ângulo de Fase entre F e z
- γ = Factor de Forma
- μ = Factor de Massa

Assim, com as expressões atrás definidas, pode-se calcular o valor absoluto do módulo de rigidez e de ângulo de fase.

Na norma pode-se encontrar ainda todas as características acerca do provete e do ensaio que o relatório do ensaio deverá mencionar.

A norma refere oito tipos de ensaios que se encontram divididos em cinco anexos. Entre os ensaios está o teste de tracção - compressão directa em provetes cilíndricos (Anexo D), que é o teste com relevo neste trabalho (Figura 2.5). Os testes são efectuados em material betuminoso através de uma carga sinusoidal, ou outro tipo de carga controlada, usando provetes com características diferente e com suportes diferentes.

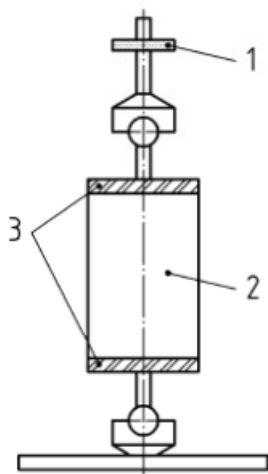


Figura 2.6- Esquema do Teste de Tracção/Compressão Directa (EN 12697-26)

Onde:

- 1 = Célula de Carga
- 2 = Provette
- 3 = Pratos de aço colados ao provete

O equipamento deve ser capaz de aplicar uma deformação sinusoidal numa gama de frequências de 0,1 a 20 Hz, uma célula de carga com capacidade de medir forças entre 1 N e 200 N com uma precisão de 5%, e com uma precisão de 1% em forças de 200 N a 6000 N. Neste teste em particular a câmara de ensaio deve manter a temperatura especificada com uma precisão de $\pm 0,3$ °C.

No anexo D pode-se ver ainda as dimensões que o provete deve ter, sendo que o diâmetro do provete deve ter entre 50 mm e 160 mm e que a sua altura deve ter entre 1,8 a 3 vezes maior que o diâmetro do provete.

Todo este processo definido na norma é usado para ordenar misturas betuminosas com base na rigidez para que se tenha uma ideia do seu comportamento quando aplicado no pavimento.

O estudo NCHRP Project 9-29 descreve em si as especificações do equipamento para a realização dos SPT's (*Simple Performance Test's*) e o respectivo tratamento de dados para calcular os valores do módulo de rigidez e do ângulo de fase. O ensaio SPT consiste na aplicação de uma carga compressiva sinusoidal a uma dada temperatura e a uma dada frequência num provete de mistura betuminosa.

A tensão aplicada e a respectiva recuperação da resposta da extensão axial do provete é medida em função do tempo e utilizada para o cálculo dos valores módulo de rigidez e ângulo de fase. O módulo de rigidez e o ângulo de fase são definidos pelas 2.8 e 2.9:

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \quad (2.8)$$

$$\Phi = \frac{T_i}{T_p} (360) \quad (2.9)$$

Onde:

- $|E^*|$ = Módulo de rigidez dinâmico
- Φ = Ângulo de fase (em graus)
- σ_0 = Amplitude de tensão
- ϵ_0 = Amplitude de extensão
- T_i = Intervalo de tempo entre compressão tracção
- T_p = Período de carregamento aplicado

Nas seguintes figuras podem-se ver um esquema do teste de módulo de rigidez dinâmica (Figura 2.6) e um esquema genérico dos dados durante um teste típico de módulo de rigidez dinâmica (Figura 2.7).

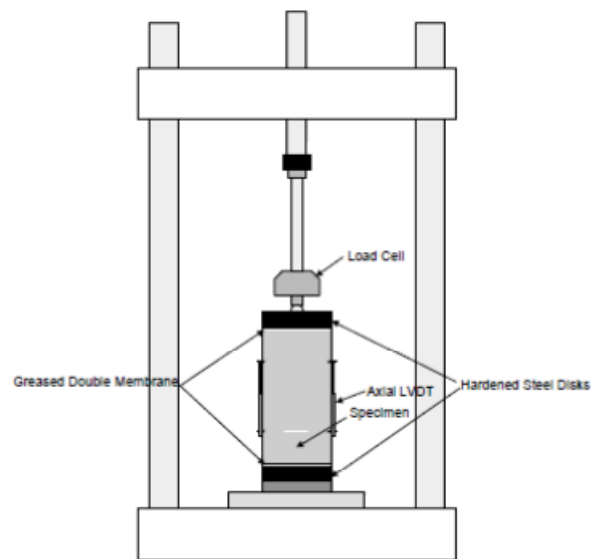


Figura 2.7 - Esquema do Teste de Módulo de Rigidez (NCHRP Project 9-29)

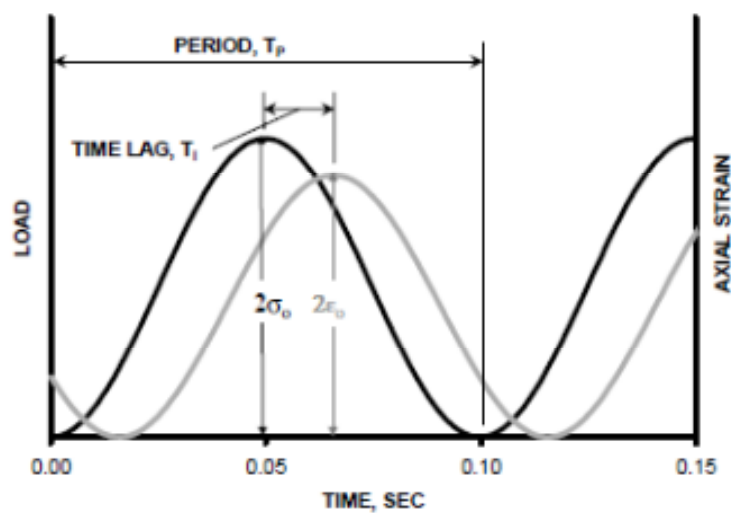


Figura 2.8 – Esquema Genérico de Dados de um Teste de Módulo de Rigidez (NCHRP Project 9-29)

O sistema do teste de módulo dinâmico consiste no equipamento de teste, uma câmara climática, um sistema de medição e o suporte do provete. A câmara climática deve ser capaz de controlar a temperatura desejada para o provete, que deverá situar-se entre os 25°C e os 60°C com uma precisão de $\pm 0,5$ °C. O sistema de medição deve ser capaz de medir e gravar os dados da carga aplicada e das deformações ao longo do tempo. Neste teste os provetes em estudo devem ter 100 mm de diâmetro e 150 mm de altura. A frequência deve estender-se entre os 0.1 aos 10 Hz.

Para chegar ao valor do módulo de rigidez e o ângulo de fase é necessário primeiro calcular a tensão exercida no provete, sendo o valor dado pela fórmula 2.10:

$$\sigma_0 = \frac{\bar{P}}{A} \quad (2.10)$$

Onde:

- \bar{P} = Média da Amplitude da Carga
- A = Área do Provete
- σ_0 = Tensão

Já para calcular a recuperação da extensão axial para cada frequência tem-se a equação 2.11:

$$\varepsilon_0 = \frac{\bar{\Delta}}{GL} \quad (2.11)$$

Onde:

- $\bar{\Delta}$ = Média da Amplitude de Deformação
- GL = Medida do Comprimento
- ε_0 = Extensão

Com os valores dados pelo cálculo da tensão e da extensão, pode-se determinar o valor do módulo de rigidez ($|E^*|$) e o valor do ângulo de fase (Φ) para cada frequência através das equações 2.8 e 2.9 respectivamente.

Tem-se assim os valores experimentais do módulo de rigidez e do ângulo de fase de acordo com o estudo NCHRP 9-29.

O estudo NCHRP 9-29 prevê o cálculo expressões de aproximação aos dados através de uma regressão pelo método dos mínimos quadrados, pois é tido como um método mais simples e directo e que permite calcular erros e outros indicadores da qualidade dos dados.

Numa primeira fase de cálculo, os dados para cada transdutor são centrados subtraindo a média do transdutor do valor obtido no teste 2.12.

$$Y'_{ji} = Y_{ji} - \bar{Y}_j \quad (2.12)$$

Onde:

- Y'_{ji} = Valor centrado para o transdutor j para o tempo i
- Y_{ji} = Valor do transdutor para o tempo i
- \bar{Y}_j = Média para o transdutor j

Num segundo passo do procedimento constrói-se a matriz $[X'X]$ como se mostra seguidamente:

$$[X'X] = \begin{bmatrix} N & \sum_{i=1}^n t_i & \sum_{i=1}^n \cos(w_0 t_i) & \sum_{i=1}^n \sin(w_0 t_i) \\ \sum_{i=1}^n t_i & \sum_{i=1}^n t_i^2 & \sum_{i=1}^n t_i \cos(w_0 t_i) & \sum_{i=1}^n t_i \sin(w_0 t_i) \\ \sum_{i=1}^n \cos(w_0 t_i) & \sum_{i=1}^n t_i \cos(w_0 t_i) & \sum_{i=1}^n \cos^2(w_0 t_i) & \sum_{i=1}^n \cos(w_0 t_i) \sin(w_0 t_i) \\ \sum_{i=1}^n \sin(w_0 t_i) & \sum_{i=1}^n t_i \sin(w_0 t_i) & \sum_{i=1}^n \cos(w_0 t_i) \sin(w_0 t_i) & \sum_{i=1}^n \sin^2(w_0 t_i) \end{bmatrix}$$

Para cada transdutor é construída uma matriz como a apresentada em baixo:

$$[X'Y_j] = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n Y'_{ji} \\ \sum_{i=1}^n Y'_{ji} t_i \\ \sum_{i=1}^n Y'_{ji} \cos(w_0 t_i) \\ \sum_{i=1}^n Y'_{ji} \sin(w_0 t_i) \end{bmatrix}$$

A coluna com os coeficientes de regressão para cada transdutor é calculada multiplicando a inversa da matriz $[X'X]$ pela matriz $[X'Y_j]$, como se pode ver de seguida:

$$\begin{bmatrix} A_{j0} \\ A_{j1} \\ A_{j2} \\ B_{j2} \end{bmatrix} = [X'X]^{-1} [X'Y_j]$$

Finalmente, a expressão 2.15 determina os valores para cada transdutor:

$$\hat{Y}_{j0} = A_{j0} + A_{j1}t_i + A_{j2} \cos(w_0 t_i) + B_{j2} \sin(w_0 t_i) + \varepsilon_{ji} \quad (2.15)$$

Onde:

- \hat{Y}_{j0} = Valor Esperado para o Transdutor j
- ε_{ji} = Termo do Erro da Regressão

2.6 Ensaio Axial de Compressão Repetida em Estudo

Existem vários ensaios que podem ser utilizados para a determinação das características mecânicas das misturas betuminosas, sendo eles, os ensaios de tracção ou compressão uniaxial com ou sem confinamento, os ensaios de corte, ensaios de flexão e os ensaios de tracção indirecta.

Para a determinação do módulo de rigidez realizaram-se ensaios axiais de compressão repetida (Figura 2.8), e segundo alguns estudos estes ensaios levam a uma determinação de um valor de módulo de rigidez muito elevado (*Di Benedetto and De La Roche, 1998*). Os provetes utilizados nos ensaios foram produzidos em laboratório, sendo que a mistura foi efectuada quando o betume se encontrava entre uma temperatura de 130°C a 140°C pois é quando os betumes apresentam uma viscosidade de 0,2 Pa.s, a sua compactação foi realizada para uma temperatura entre os 80°C e os 100°C quando o betume tem uma viscosidade entre 2 e 20 Pa.s, produzindo-se lajes.

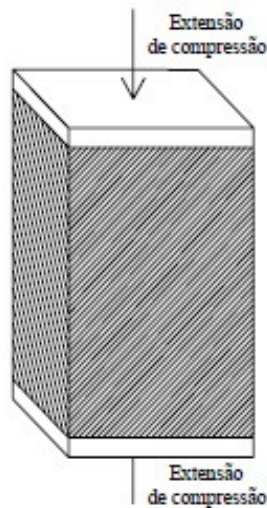


Figura 2.9 – Configuração do Ensaio de Compressão (Silva, H, 2005)

Seguidamente as lajes foram cortadas em provetes $5 \times 5 \times 8 \text{ cm}^3$, sendo feitas pequenas incisões a meia altura dos provetes para ser possível controlar a superfície de rotura. Os provetes deveriam ser maiores para se ter uma maior fiabilidade dos resultados obtidos, mas devido às condições específicas do mastique e também dos ensaios a realizar tal não foi possível.

Os procedimentos utilizados para a obtenção dos dados em estudo no ensaio foram baseados na norma EN 12697-26 (2003), aplicando-se um carregamento cíclico sinusoidal em controlo de deformação. Os ensaios foram realizados às temperaturas de 5°C , 15°C e 25°C e às frequências 10 Hz, 5 Hz, 2 Hz, 1 Hz, 0.5 Hz, 0.2 Hz, 0.1 Hz, 0.05 Hz e 0.02 Hz tanto para os provetes de mastique betuminoso e mistura betuminosa, tendo sido também realizado um ensaio para os provetes de mastique betuminoso à frequência de 0.01 Hz.

Finalmente, tendo os valores experimentais calcularam-se os valores do módulo de rigidez e do ângulo de fase para cada um dos provetes através da formulação indicada pela norma europeia EN 12697-26 (2003).

Capítulo 3

Programa Experimental

3.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados as diferentes composições e características dos provetes e o procedimento para a caracterização do comportamento mecânico dos provetes e de toda a restante informação necessária que originou as séries de dados em estudo no presente trabalho.

Na secção 2 deste capítulo são apresentados a composição e as diferentes características que se pretendem estudar nos diferentes tipos de provetes de mastique e de misturas betuminosas.

Na secção 3 do presente capítulo, com base nos resultados e conclusões presentes na tese de doutoramento do Professor Doutor Hugo Silva apresenta-se uma caracterização de como diferentes composições dos provetes afectam o comportamento mecânico das misturas betuminosas.

Finalmente na quarta secção são apresentados os dados que foram utilizados no presente trabalho, referindo todos os pormenores considerados importantes. Apresenta-se ainda um pequeno exemplo de uma lista de dados.

3.2 Características dos Provetes em Estudo

O comportamento mecânico das misturas betuminosas depende da sua composição e das características dos materiais que o compõem. Silva (2005) estudou em laboratório misturas e mastiques betuminosos com diferentes composições e características. Este estudo procurou ajudar na escolha de misturas betuminosas com o melhor desempenho para cada tipo de pavimento pretendido, ou seja, determinar de que forma as características, como o teor e tipo de betume, o tipo de filer, a granulometria e o envelhecimento influenciam o comportamento da mistura.

Foi seleccionada uma mistura de desgaste em detrimento de uma mistura de regularização, pois tem uma maior importância a nível estrutural e funcional, e também pela opção de apenas se estudar uma mistura, possibilitando assim um maior número e tipos de ensaios realizados, permitindo assim uma melhor caracterizar adequadamente o mastique betuminoso (Silva, H., 2005).

Em primeiro lugar referem-se as características dos provetes de mistura betuminosa, apresentando depois as características dos provetes de mastique betuminoso.

De seguida é apresentado o Quadro 3.1, onde são apresentadas as características dos diferentes tipos de mistura betuminosa em estudo.

Quadro 3.1 – Composição dos provetes de mistura betuminosa (Silva, H, 2005)

Tipo de Mistura Betuminosa	MBD 1	MBD 2	MBD 3	MBD 4	MBD 5	MBD 6	MBD 7	MBD 8
Granulometria								
Passados #3/4"	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Passados #1/2'	83,7%	83,7%	83,7%	83,7%	83,7%	83,7%	83,7%	83,7%
Passados #4	47,8%	47,8%	47,8%	47,8%	47,8%	47,8%	47,8%	47,8%
Passados #10	32,5%	32,5%	32,5%	32,5%	32,5%	32,5%	32,5%	32,5%
Passados #40	16,9%	16,9%	16,9%	16,9%	16,9%	22,4%	8,5%	16,9%
Passados #80	9,4%	9,4%	9,4%	9,4%	9,4%	13,3%	4,9%	9,4%
Passados #200	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	7,6%	3,0%	5,2%
Teor em Betume	Médio: 5,2%	Inferior: 4,4%	Superior: 5,9%	Médio: 5,2%	Médio: 5,2%	Médio: 6,5%	Médio: 3,2%	Médio: 5,2%
Tipo de Betume	35/50	35/50	35/50	50/70	35/50	35/50	35/50	35/50
Tipo de Filer	Comercial	Comercial	Comercial	Comercial	Recuperado	Comercial	Comercial	Comercial
Origem do Filer	Calcário	Calcário	Calcário	Calcário	Granito	Calcário	Calcário	Calcário
Condicionamento Inicial	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Sim

Para a composição base (mistura MBD 1) foi escolhido o betume mais duro (35/50) e o filer comercial (calcário), pois em princípio são os que melhoram as características do betume. Sendo que houve um provete onde se utilizou o betume do tipo 50/70 (mistura MBD 4) e outro provete com filer recuperado (granito) (mistura MBD 5).

Para ter mais meios de comparação e análise dos dados variou-se também o teor em betume, testando um teor em betume inferior (mistura MBD 2) e um teor em betume superior (mistura MBD 3) e o condicionamento inicial (envelhecimento) (mistura MBD 8). Esse condicionamento inicial procurou simular o envelhecimento a curto prazo que ocorre nas misturas betuminosas. Variou-se também a fracção utilizada, variando as dimensões dos agregados que passam a partir do peneiro #10 (misturas MBD 6 e 7).

Os provetes de mastique betuminoso são característicos dos provetes de mistura betuminosa identificados pelo mesmo número.

No Quadro 3.2 pode observar-se a composição de cada tipo de mastique preparado, indicando a fracção utilizada, a granulometria dos agregados, o teor do betume, o tipo de betume, o tipo e a origem do filer e se os provetes são ou não sujeitos a condicionamento inicial (envelhecimento). Em relação ao teor em betume do mastique betuminoso, este é dado pelo peso do betume presente numa fracção de mistura betuminosa a dividir pelo peso dos agregados que compõem o mastique.

Quadro 3.2 – Composição dos provetes de mastique betuminoso (Silva, H, 2005)

Tipo de Mastique	Mastique 1	Mastique 2	Mastique 3	Mastique 4	Mastique 5	Mastique 6	Mastique 7	Mastique 8
Fracção	2	2	2	2	2	1	3	2
Granulometria								
Passados #10	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Passados #20	73,8%	73,8%	73,8%	73,8%	73,8%	83,0%	52,3%	73,8%
Passados #40	52,1%	52,1%	52,1%	52,1%	52,1%	68,8%	26,0%	52,1%
Passados #80	28,9%	28,9%	28,9%	28,9%	28,9%	40,9%	15,1%	28,9%
Passados #200	16,2%	16,2%	16,2%	16,2%	16,2%	23,3%	9,2%	16,2%
Teor em Betume	Médio: 15,9%	Inferior: 13,6%	Superior: 18,2%	Médio: 15,9%	Médio: 15,9%	Médio: 19,9%	Médio: 9,8%	Médio: 15,9%
Tipo de Betume	35/50	35/50	35/50	50/70	35/50	35/50	35/50	35/50
Tipo de Filer	Comercial	Comercial	Comercial	Comercial	Recuperado	Comercial	Comercial	Comercial
Origem do Filer	Calcário	Calcário	Calcário	Calcário	Granito	Calcário	Calcário	Calcário
Condicionamento Inicial	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Sim

Na tese do Professor Hugo Silva é ainda apresentado a composição média do mastique existente nas várias fracções das misturas betuminosas, sendo apresentadas 3 fracções com diferente tamanho de agregados. A composição base da mistura e do mastique betuminoso corresponde à fracção 2, sendo ainda utilizadas as fracções 1 e 3, cada uma delas num provete de modo a comparar a influência do tamanho dos agregados pode influenciar as misturas betuminosas. A escolha da fracção 2 para a mistura base, deve-se ao facto de a composição granulométrica do mastique e dos agregados grossos dessas fracções se aproximar bastante da composição inicial das misturas betuminosas (Silva, H. 2005). No Quadro 3.3 para além da quantidade de agregados que passam nos

diferentes peneiros pode observar-se também o teor em betume do mastique presente em cada uma das fracções referidas.

Quadro 3.3 – Fracções utilizadas na composição dos mastiques (Silva, H, 2005)

Peneiro	Diâmetro	Mastique das Misturas Betuminosas de Desgaste		
		Fracção 1 (Passado no #3/8" e retido no #10)	Fracção 2 (Passado no #3/8" e retido no #10)	Fracção 3 (Passado no #3/8" e retido no #10)
#10	2,000	100,0%	100,0%	100,0%
#20	0,850	93,5%	72,1%	61,6%
#40	0,425	79,1%	57,1%	33,6%
#80	0,180	49,4%	34,5%	17,5%
#200	0,075	27,4%	18,9%	9,5%
Teor em betume do mastique (%)		24,9%	17,1%	10,9%

3.3 Caracterização do Comportamento Mecânico das Misturas

Com as composições dos mastiques e das misturas betuminosas definidas, foram então feitos ensaios com vista a caracterização do comportamento mecânico dos mastiques e misturas betuminosas. Entre os ensaios está o ensaio axial de compressão/tracção repetida, que é o ensaio relevante para o estudo neste trabalho, pelo que só se abordará esse ensaio, os seus resultados e o modo como as características dos provetes influenciam o módulo de rigidez e ângulo de fase.

Em relação aos resultados dos ensaios do mastique betuminoso, verificou-se que o módulo de rigidez aumenta com o aumento de frequência das cargas cíclicas, pelo contrário, quando se tem um maior teor de betume existe uma redução do módulo de rigidez em conjunto com o aumento do ângulo de fase. O envelhecimento do mastique provoca um aumento do módulo de rigidez e uma diminuição do ângulo de fase. Já o tipo de filer implica principalmente diferenças ao nível do módulo de rigidez, sendo que um mastique betuminoso com filer calcário apresenta maior módulo de rigidez, embora o ângulo de fase se mantenha praticamente inalterado independentemente do filer utilizado. Verificou-se igualmente que existe um aumento do ângulo de fase com um aumento da frequência de aplicação de carga quando se tem um mastique com um teor elevado ou menos viscoso.

Pode ver-se nas figuras 3.1 e 3.2 os resultados para o módulo de rigidez e do ângulo de fase para os provetes com as diferentes características definidas na secção anterior.

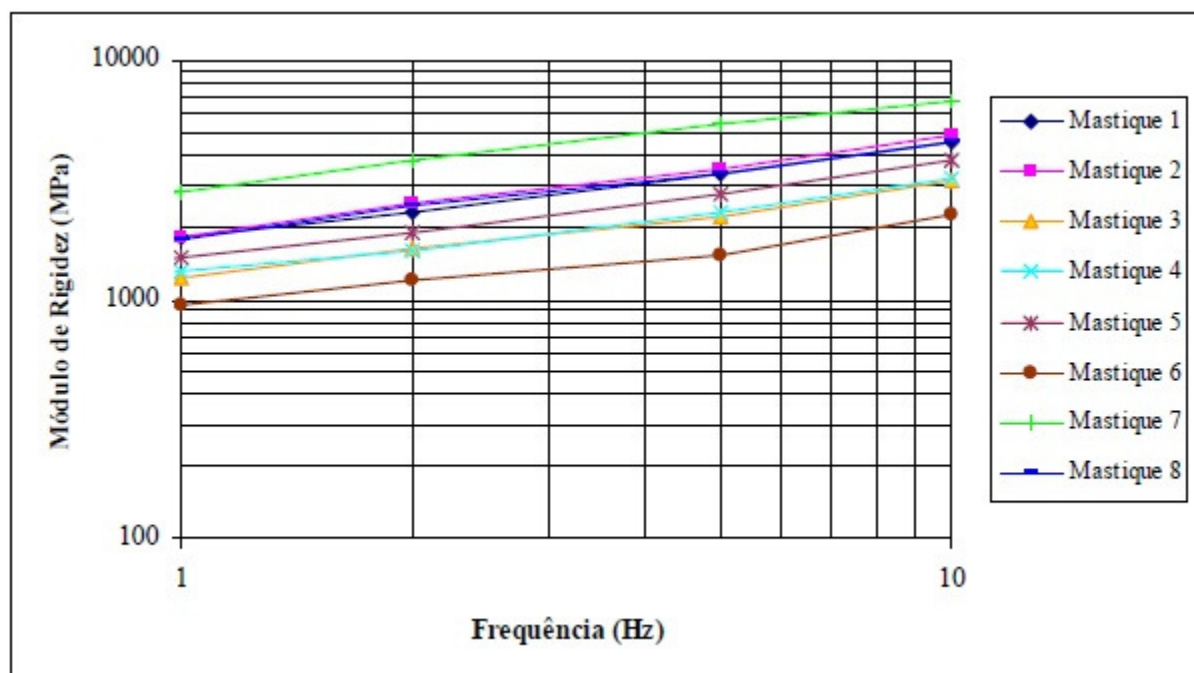


Figura 3.1 – Módulo de rigidez dos diversos masticos a 20 °C (Silva, H, 2005)

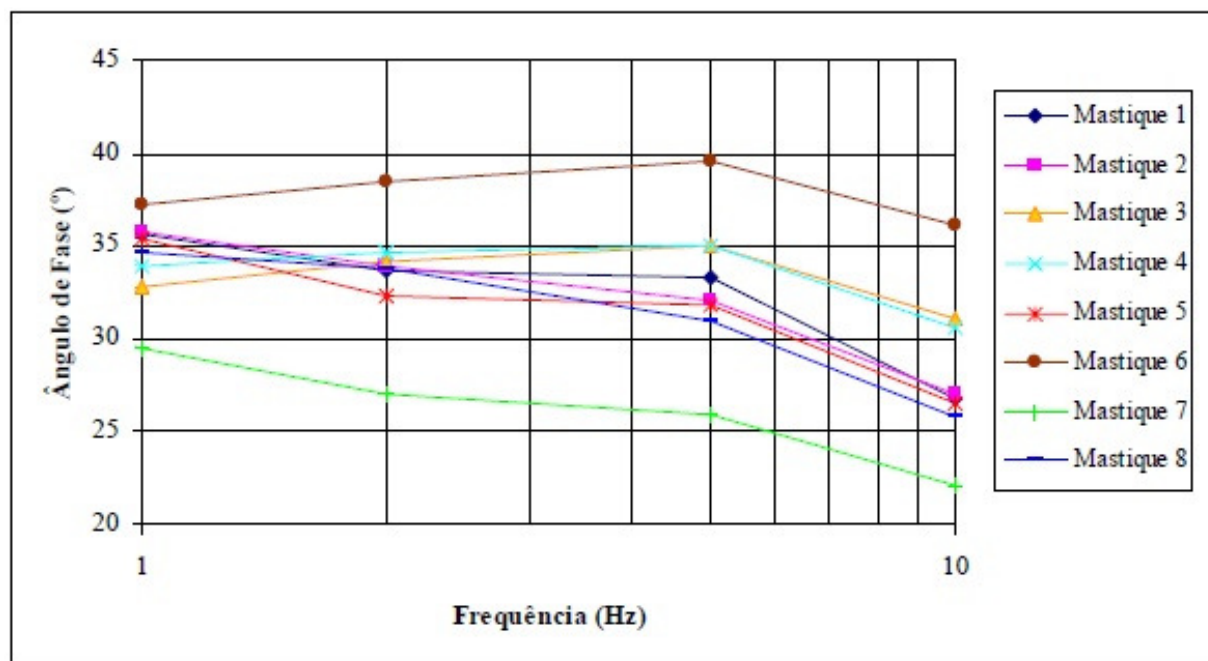


Figura 3.2 – Ângulo de fase dos diversos masticos a 20 °C (Silva, H, 2005)

Nos ensaios referentes às misturas betuminosas, o módulo de rigidez verificou aumentos quando na sua composição tem um betume mais duro, filer calcário, uma

granulometria mais fina, porosidade mais baixa e também quando a mistura betuminosa se encontra envelhecida. O módulo de rigidez nas misturas betuminosas aumenta também com um maior teor em betume, mas isso apenas acontece na presença de frequências elevadas.

Nas figuras 3.3 e 3.4 pode observar-se o comportamento dos provetes de misturas betuminosas com características diferentes.

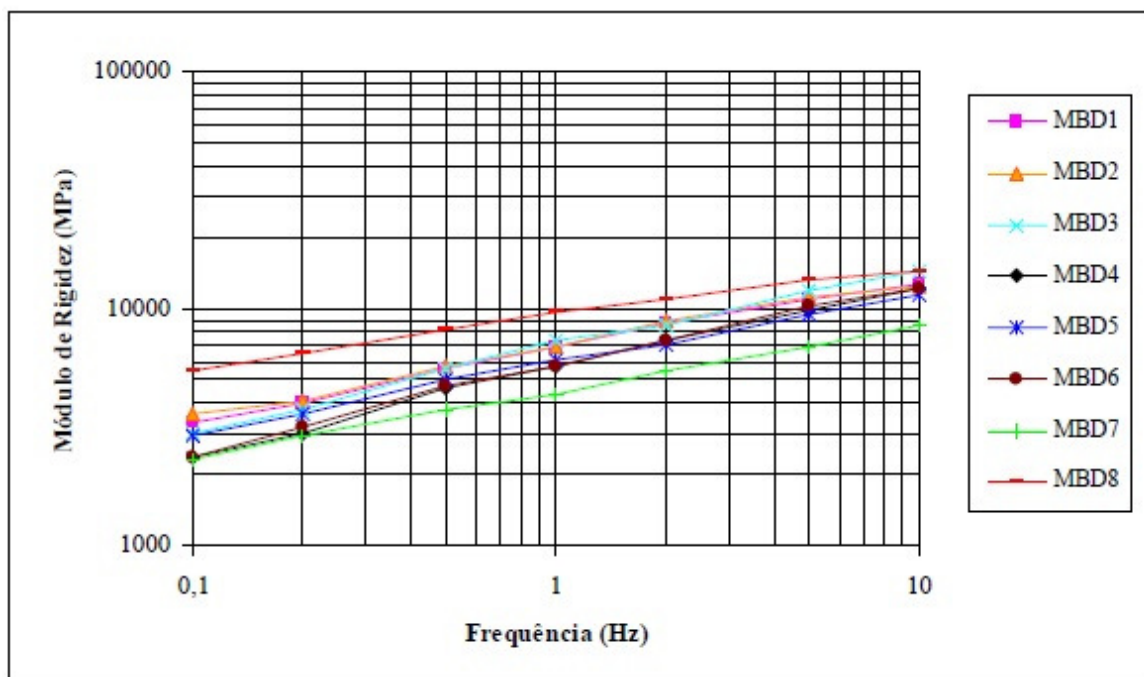


Figura 3.3 – Módulo de rigidez das diversas misturas betuminosas a 20 °C (Silva, H, 2005)

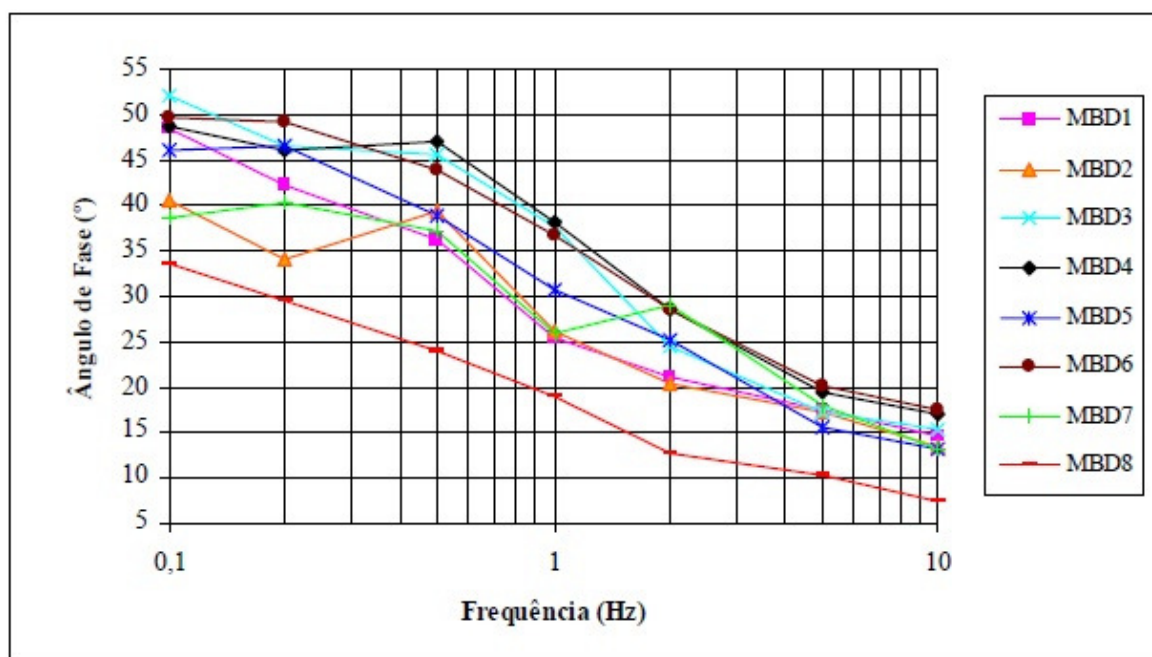


Figura 3.4 – Ângulo de fase das diversas misturas betuminosas a 20 °C (Silva, H, 2005)

Da comparação dos resultados dos ensaios dos mastiques e das misturas betuminosas verificou-se que o se consegue obter uma boa correlação entre o comportamento dos dois materiais, comprovando que o desempenho das misturas betuminosas estão dependentes do mastique que lhes deu origem.

3.4 Dados Utilizados

No estudo efectuado no presente trabalho, como já foi referido, os dados relevantes são os dados provenientes dos ensaios axiais de compressão/tracção repetida, para as temperaturas de 5 °C, 15 °C e 25 °C às frequências de 10 Hz, 5 Hz, 2 HZ, 1 Hz, 0.5 Hz, 0.2 Hz, 0.1 Hz, 0.05 Hz e 0.02 Hz para ambos os provetes de mastique e mistura betuminosa, e apenas a frequência de 0.01 Hz para os provetes de mistura de betuminosa já que para os provetes de mastique betuminoso ou não foi efectuado o ensaio para essa frequência ou não foram fornecidos os dados. Em baixo no Quadro 3.4, pode-se ver o número de ciclos a que os provetes foram submetidos correspondente a cada frequência.

Quadro 3.4 – Número de ciclos por frequência dos mastiques betuminosos

Frequência (Hz)	Ciclos
10	200
5	100
2	20
1	20
0,5	7
0,2	7
0,1	7
0,05	4
0,02	4
0,01	4

Para os dados das misturas betuminosas, apesar de terem sido sujeitos aos mesmos ciclos presentes na tabela acima, não foram fornecidos a totalidade dos ciclos, podendo ser visto na tabela 3.5 o número de ciclos fornecidos para cada frequência e também qual o seu intervalo.

Quadro 3.5 – Número de ciclos por frequência das misturas betuminosas

Frequência (Hz)	Número de Ciclos Fornecidos	Intervalo dos Ciclos
10	50	100 - 150
5	30	70 - 100
2	10	10 - 20
1	10	11 - 20
0,5	7	0 - 7
0,2	7	0 - 7
0,1	7	0 - 7
0,05	4	0 - 4
0,02	4	0 - 4

Os dados necessários para o cálculo do módulo de rigidez e ângulo de fase são a carga aplicada no provete (dada em N) e o deslocamento medido no provete (dada em mm).

Relativamente aos dados das misturas betuminosas, para as frequências mais elevadas, apenas foram fornecidos dados relativos a um intervalo dos ciclos, pelo que foi apenas estudado esse intervalo. Para o mastique betuminoso foram fornecidos todos os dados para todas as frequências.

Para os provetes de mastique betuminoso não foram fornecidas as dimensões exactas dos provetes, pelo que se adoptou as medidas genéricas de 5x5x8 cm³. Já em relação às medidas dos provetes de mistura betuminosa foram fornecidas as medidas exactas dos provetes, permitindo um cálculo mais exacto das tensões e extensões actuantes.

No quadro 3.6 apresenta-se um exemplo de uma lista de dados fornecida para um provete aleatório, para se perceber melhor com que tipo de dados se lidou no presente estudo.

Quadro 3.6 – Exemplo de lista de dados fornecidos

Segundos	Ciclo	Sequência	Carga (N)	Deformação (mm)
0,000	0	1	-23	0,23851
0,004	1	1	-25,9	0,23854
0,006	1	1	-28,9	0,23847
0,008	1	1	-28,9	0,2386
0,010	1	1	-30,3	0,23854
0,012	1	1	-30,3	0,23849
0,014	1	1	-28,1	0,23849
0,016	1	1	-26,7	0,23836
0,018	1	1	-24,5	0,23859
0,020	1	1	-22,3	0,23855
0,022	1	1	-20,1	0,23859
0,024	1	1	-15,7	0,23862
0,026	1	1	-16,4	0,23859
0,028	1	1	-12,7	0,23889
0,030	1	1	-3,9	0,23925
0,032	1	1	10	0,23982
...
371,636	4	10	-9,8	0,24224
373,302	4	10	-17,1	0,24213
374,968	4	10	-29,6	0,24195
376,634	4	10	-47,2	0,24165
378,300	4	10	-67	0,24093
379,966	4	10	-83,9	0,24025
381,632	4	10	-101,4	0,23939
383,298	4	10	-117,6	0,23851
384,964	4	10	-133,7	0,23767
386,630	4	10	-149,1	0,23678
388,296	4	10	-165,2	0,23624
389,962	4	10	-176,2	0,23571
391,628	4	10	-182,8	0,23528
393,294	4	10	-190,2	0,23498
394,960	4	10	-195,3	0,23475
396,626	4	10	-197,5	0,23485
398,292	4	10	-197,5	0,23492
399,958	4	10	-195,3	0,2349

Capítulo 4

Análise dos Dados

4.1 Introdução

Neste capítulo vai-se abordar toda a análise dos dados feita neste trabalho, explicando todo o método seguido para a obtenção dos valores de módulo de rigidez e ângulo de fase.

Na segunda secção deste capítulo descreve-se a metodologia de pós-processamento apresentada por Liu *et al* e os resultados obtidos para o módulo de rigidez e ângulo de fase.

Seguidamente apresenta-se a metodologia de determinação dos modelos de regressão e avaliação do ajustamento, implementada com o programa *Wolfram Mathematica*.

A definição dos procedimentos de cálculo do módulo de rigidez e ângulo de fase é realizada na quarta secção do presente capítulo, onde são definidos os diferentes procedimentos utilizados.

Na última secção são apresentados os dados obtidos e a análise da qualidade do ajuste para as equações obtidas para a tensão e extensão.

4.2 Artigo em Estudo

As metodologias que este trabalho aborda foram baseadas no artigo “Postprocessing Method for Dynamic Modulus Tests of Hot-Mix Asphalt” de Liu *et al.* (2010), e serão posteriormente descritas. No artigo é proposta uma metodologia de pós-processamento para determinação dos valores do módulo dinâmico e do ângulo de fase nas misturas betuminosas, identificar equações de regressão optimizadas para a compressão e a correspondente extensão utilizando o método proposto e avaliar a precisão do método com os ensaios SPT's.

Para chegar aos valores do módulo de elasticidade e do ângulo de fase, tem que se numa primeira fase encontrar uma equação que se ajuste aos dados. De acordo com Liu *et al.* pode-se ter 2 equações para o ajuste dos valores da tensão e 3 equações para o ajuste da extensão.

Para o ajustamento da tensão o artigo refere as equações:

$$\sigma = a \cos(\omega t) + b \sin(\omega t) + c \quad (4.1)$$

$$\sigma = a \cos(\omega t) + b \sin(\omega t) + c + dt \quad (4.2)$$

Onde:

- a, b, c e d = constantes provenientes da regressão
- ω = frequência angular
- t = tempo de carregamento

Mostram-se agora as equações para o ajustamento da extensão referidas no artigo:

$$\varepsilon = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t) + C + Ee^{Ft} + Dt \quad (4.3)$$

$$\varepsilon = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t) + C + Ee^{Ft} + Dt + Gt^2 \quad (4.4)$$

$$\varepsilon = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t) + C + Dt \quad (4.5)$$

Onde:

- A, B, C, D, E e F = constantes provenientes da regressão
- ω = frequência angular
- t = tempo de carregamento

De acordo com o conceito de reologia (Malkin and Lsayew 2006; Tschoegl 1989), a resposta da extensão devido às equações (4.1) e (4.2) podem ser dadas pelas equações (4.3) e (4.4) respectivamente, enquanto pela especificação SPT a tensão é dada pela equação (4.2) e extensão é dada pela equação similar (4.5), onde a única diferença é o valor das constantes.

O artigo define que de acordo com a especificação SPT, o módulo dinâmico e o ângulo de fase são determinados em função dos coeficientes de regressão do modo como é demonstrado a seguir:

1. A amplitude de tensão σ_0 e a tangente do ângulo de fase Φ_σ são calculadas através das seguintes equações

$$\sigma_0 = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (4.6)$$

$$\Phi_{\sigma 0} = \tan^{-1} \left(-\frac{b}{a} \right) \quad (4.7)$$

2. A amplitude de extensão ε_{0j} e a tangente do ângulo de fase $\Phi_{\tau 0}$ é dada pelas seguintes equações

$$\varepsilon_{0j} = \sqrt{A^2 + B^2} \quad (4.8)$$

$$\Phi_{\varepsilon 0} = \tan^{-1} \left(-\frac{B}{A} \right) \quad (4.9)$$

3. O módulo dinâmico e o ângulo de fase são calculados então pelas seguintes equações

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} = \frac{3\sigma_0}{\varepsilon_{02} + \varepsilon_{03} + \varepsilon_{04}} \quad (4.10)$$

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (4.11)$$

$$\Phi = \Phi_{\sigma} - \frac{(\Phi_{\varepsilon 2} + \Phi_{\varepsilon 3} + \Phi_{\varepsilon 4})}{3} \quad (4.12)$$

No estudo para este artigo foi definido que para a tensão a equação (4.2), corresponde ao procedimento 1 (*Prostress #1*) e a equação (4.1) corresponde ao procedimento 2 (*Prostress #2*). Para a extensão a equação (4.4) corresponde ao procedimento 1 (*Prostrain #1*), a equação (4.3) ao procedimento 2 (*Prostrain #2*) e a equação (4.5) ao procedimento 3 (*Prostrain #3*).

Numa análise qualitativa em relação aos procedimentos feita no artigo de Liu et al (2010), verificou-se que o melhor procedimento para a tensão era o procedimento 1 (*Prostress #1*), podendo essa situação ser vista na figura 4.1, onde se pode ver que os erros padrão são menores para o procedimento 1 (*Prostress #1*) em relação ao procedimento 2 (*Prostress #2*). Já para a extensão, é demonstrado no artigo que para os procedimentos 1 (*Prostrain #1*) e 2 (*Prostrain #2*) se obteve menos erro (figura 4.2). Considerando esses dois procedimentos (*Prostress #1* e *Prostrain #1/Prostrain #2*) como os óptimos para o pós-processamento, calcularam-se os valores do módulo de rigidez e ângulo de fase considerados óptimos, e que servem de comparação com os resultados obtidos para o módulo de rigidez e ângulo de fase utilizando o procedimento 1 (*Prostress #1*) para a tensão e o procedimento 3 para a extensão (*Prostrain #3*), que correspondem às equações da especificação do ensaio SPT. Pode ver-se essa comparação de valores de módulo de rigidez e de ângulo de fase na figura 4.3, onde no eixo das abcissas temos o valor considerado ótimo e no eixo das ordenadas temos o valor medido para as equações correspondentes ao ensaio SPT.

Para além de no artigo se ter concluído quais os procedimentos de pós-processamento óptimos, também se concluiu que tanto a temperatura como a frequência afectam os valores obtidos, sendo maior o erro a temperaturas altas e frequências baixas.

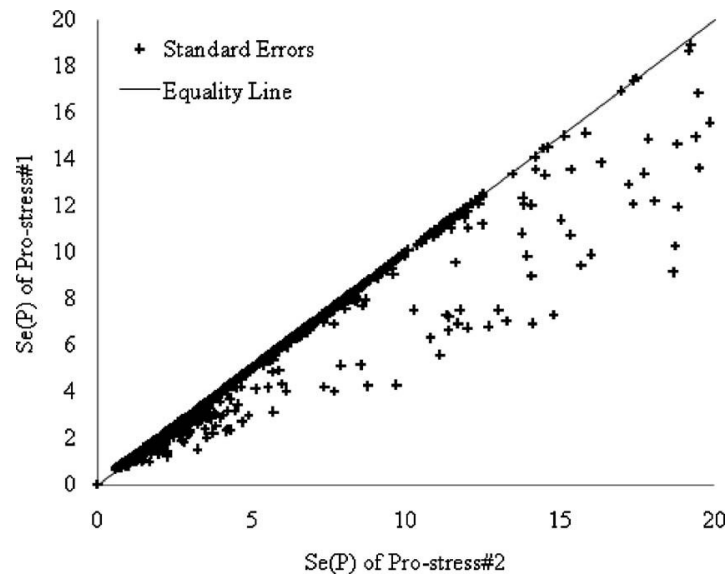
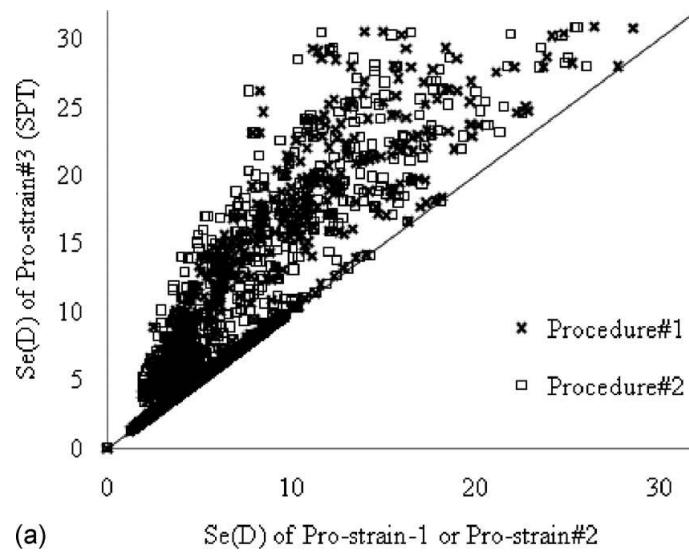
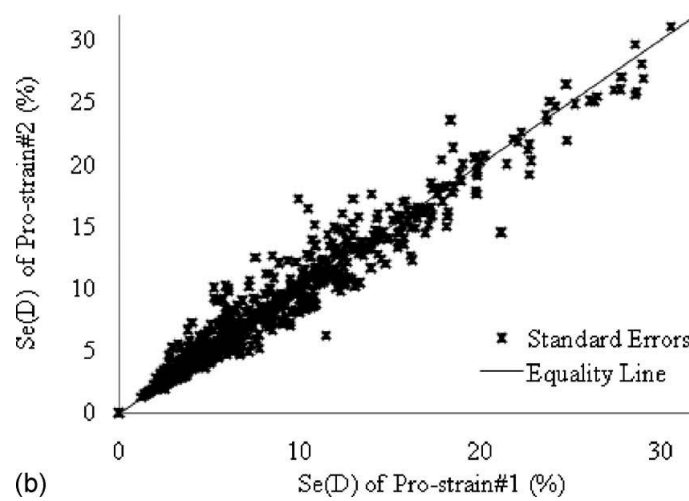


Figura 4.1 – Erros padrão do *Prostress #1* vs *Prostress #1* (Liu et al, 2010)



(a)



(b)

Figura 4.2 – Erros padrão do *Prostrain #1e #2* vs *Prostrain #3* (a) e *Prostrain #1* vs *Prostrain #2* (b) (Liu et al, 2010)

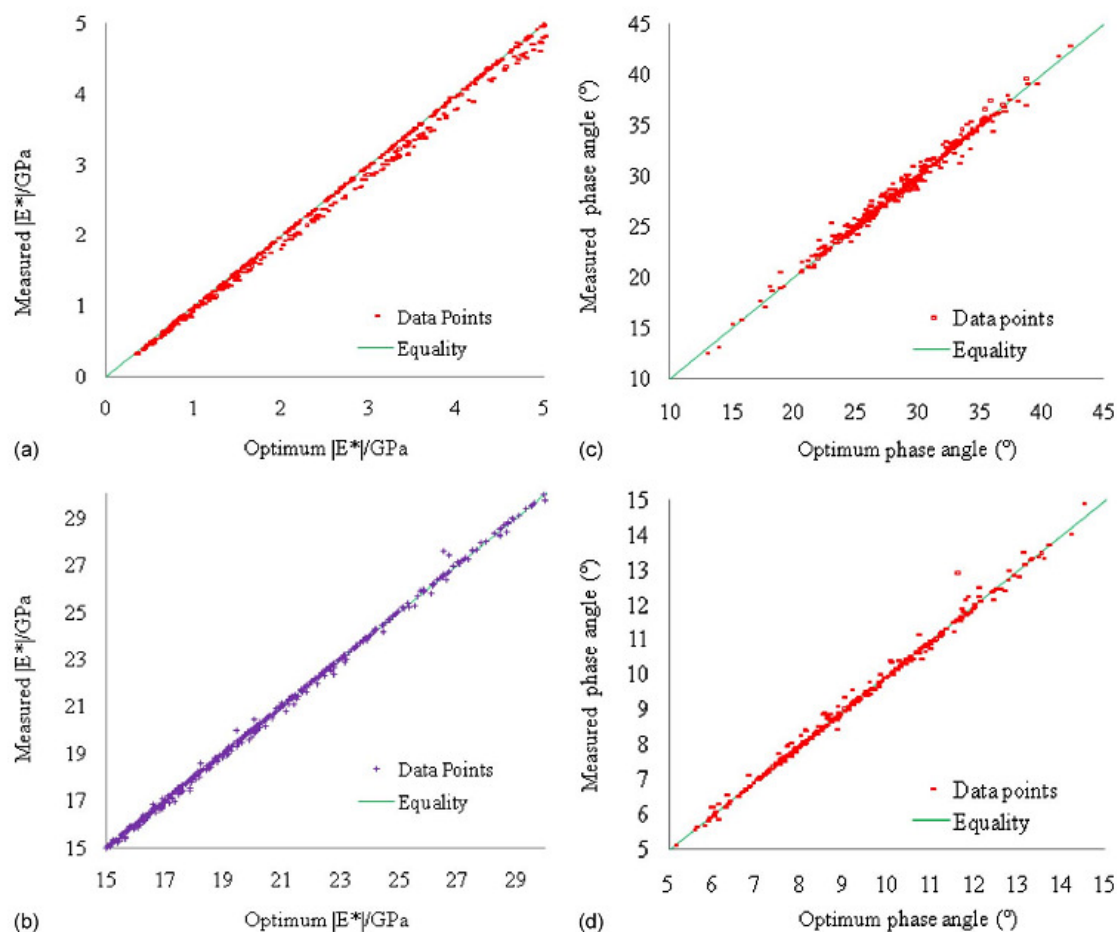


Figura 4.3 – Comparação valores de módulo de rigidez e ângulo de fase para baixas frequências e temperaturas altas - (a) e (c) e frequências altas e baixas temperaturas – (b) e (d)

4.3 Método de Regressão e Análise do Qualidade do Ajuste

Para o método de regressão foi utilizado o programa Wolfram Mathematica, que determina uma regressão baseada no método dos mínimos quadrados.

O método dos mínimos quadrados é uma técnica de otimização matemática, que procura encontrar o melhor ajustamento, sendo uma técnica que se aplica para determinar os parâmetros de uma relação funcional entre duas ou mais grandezas de um fenómeno ou o valor mais provável de uma única grandeza medida várias vezes. A única exigência do método consiste em que os erros que afectam as medições sejam aleatórios. Segundo este método, o valor esperado ou o valor mais verosímil para os parâmetros obtidos de uma equação, para o ajustamento a um conjunto de dados, é aquele que minimiza a soma dos quadrados das diferenças (resíduos).

Apesar de para um determinado modelo e um determinado conjunto de dados, o método dos mínimos quadrados gerar uma solução única, é possível fazer o ajustamento

usando várias técnicas, que se distinguem pelo tipo de elementos envolvidos no ajustamento e modo de definir o modelo funcional.

O modelo funcional para resolver um determinado problema pode ser escrito de várias formas, podendo incluir-se nele, para além das observações, outras variáveis e constantes numéricas. As outras variáveis que podem surgir no modelo são denominadas de parâmetros. Estes parâmetros têm à partida valores desconhecidos, de que se pode apenas conhecer valores aproximados, sendo obtidas estimativas para os seus valores com o ajustamento.

Para uma primeira tentativa de avaliação do ajustamento pelo método dos mínimos quadrados, utiliza-se o SQR (Soma dos Quadrado dos Resíduos) através da seguinte equação:

$$SQR = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4.13)$$

Onde:

- y_i = Valores dos dados em estudo
- \hat{y}_i = Valores dados pela equação de ajuste

Porém esta medida está dependente das unidades em que a variável dependente é medida, e por essa razão não permite uma avaliação rigorosa.

Uma boa medida da qualidade do ajustamento é o coeficiente de correlação, que afere a relação do ajustamento à série de dados em estudo, sendo este a medida a que se dará maior importância neste trabalho para avaliar a qualidade dos ajustes dos procedimentos. O coeficiente é dado pela seguinte equação:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.14)$$

O coeficiente varia entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1 mais explicativo é o modelo (Santos, R., 2008)

4.4 Definição dos Procedimentos

Para se poder trabalhar os dados fornecidos de acordo com o método referido no artigo anterior, foi necessário calcular as tensões e extensões a partir dos valores da carga e da deformação do provete.

Assim para termos a tensão exercida no provete foi necessário dividir o valor da carga no instante t pela área do provete, enquanto para calcular a extensão no provete foi

necessário dividir a diferença de altura do provete pela altura inicial. Em baixo apresentam-se as fórmulas utilizadas.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4.15)$$

Onde:

- F = Carga aplicada no instante t (N)
- A = Área do provete (m^2)
- σ = Tensão (Pa)

$$\varepsilon = -\frac{\Delta x}{H_0} \quad (4.16)$$

Onde:

- Δx = Diferença de altura do provete (m)
- H_0 = Altura do provete (m)
- ε = Extensão (Pa)

Tendo os dados em tensões e extensões, o próximo passo a seguir foi de retirar do programa Wolfram Mathematica as equações de ajuste dadas pelo artigo em estudo de acordo com os seguintes procedimentos definidos:

Procedimento 1: $\sigma = a \cos(\omega t) + b \sin(\omega t) + c + dt \quad (4.2)$

$$\varepsilon = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t) + C + Dt \quad (4.5)$$

Procedimento 2: $\sigma = a \cos(\omega t) + b \sin(\omega t) + c \quad (4.1)$

$$\varepsilon = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t) + C + Ee^{Ft} + Dt \quad (4.3)$$

Procedimento 3: $\sigma = a \cos(\omega t) + b \sin(\omega t) + c + dt \quad (4.2)$

$$\varepsilon = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t) + C + Ee^{Ft} + Dt + Gt^2 \quad (4.4)$$

Para cada uma das equações obtidas foi calculado o coeficiente de correlação entre a série de dados experimentais e a série de dados dada pelas equações da regressão.

Depois de aferir a qualidade do ajuste procedeu-se então ao cálculo do módulo de rigidez e do ângulo de fase através das equações definidas no artigo, exceptuando as apresentadas em baixo para o valor do módulo de rigidez e do ângulo de fase, que devido a apenas se ter dados de um transdutor se podem apresentar assim. Comparou-se esses

valores com os valores fornecidos pelo Prof. Hugo Silva de modo a verificar se o método está próximo dos valores esperados.

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (4.17)$$

$$\Phi = \Phi_{\sigma 0} - \Phi_{\varepsilon 0} \quad (4.18)$$

Em anexo são apresentados todos os valores obtidos para o módulo de rigidez e ângulo de fase. No anexo A são apresentados os valores de módulo de rigidez e ângulo de fase para os provetes de mastique betuminoso e no Anexo B os valores obtidos para os provetes de mistura betuminosa.

4.5 Resultados Obtidos e Comparação

Através dos procedimentos acima definidos obteve-se as equações das tensões e extensões para o conjunto de dados fornecido. Obtendo aproximações como se pode ver na Figura 4.1, onde a linha azul representa os dados experimentais e a linha vermelha a aproximação dada pela equação de ajuste.

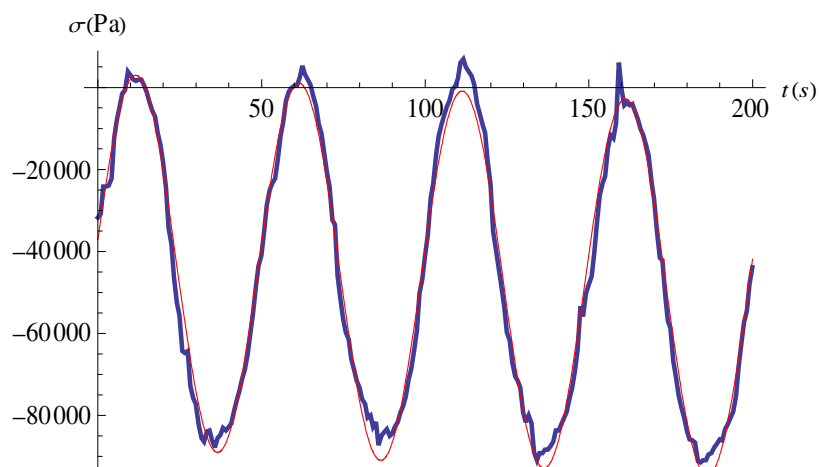


Figura 4.4 – Exemplo de ajuste de uma equação obtida aos dados em estudo

Para cada uma das equações obtidas foi calculado o coeficiente de correlação entre a série de dados experimentais e a série de dados dada pelas equações da regressão. Para o mastique betuminoso apresentam-se no quadro 4.1 e quadro 4.2 os resultados da média dos coeficientes de correlação para cada procedimento em função da frequência. Para a tensão são apresentados os Procedimentos 1 e 3 juntos pois esta é dada pela mesma equação de tensão.

Quadro 4.1 – Média do R^2 por frequência para as tensões dos mastiques betuminosos

	Procedimento 1 e 3	Procedimento 2
	R^2	R^2
10 Hz	0,797	0,773
5 Hz	0,817	0,809
2 Hz	0,901	0,894
1 Hz	0,922	0,920
0,5 Hz	0,937	0,935
0,2 Hz	0,947	0,943
0,1 Hz	0,943	0,938
0,05 Hz	0,942	0,938
0,02 Hz	0,928	0,919
0,01 Hz	0,910	0,897

Quadro 4.2 – Média do R^2 por frequência para as extensões dos mastiques betuminosos

	Procedimento 1	Procedimento 2	Procedimento 3
	R^2	R^2	R^2
10 Hz	0,822	0,809	0,809
5 Hz	0,815	0,815	0,818
2 Hz	0,915	0,916	0,917
1 Hz	0,942	0,942	0,943
0,5 Hz	0,971	0,971	0,972
0,2 Hz	0,983	0,983	0,983
0,1 Hz	0,987	0,987	0,988
0,05 Hz	0,992	0,992	0,993
0,02 Hz	0,992	0,992	0,992
0,01 Hz	0,983	0,983	0,985

Calculou-se também a média da correlação em função da temperatura para as equações da tensão e extensão dos três procedimentos em estudo, apresentando-se os valores obtidos nos quadros 4.3 e 4.4.

Quadro 4.3 – Média R^2 em função da temperatura para as tensões dos mastiques betuminosos

	Procedimento 1 e 3	Procedimento 2
	R^2	R^2
5 °C	0,943	0,932
15 °C	0,912	0,904
25 °C	0,857	0,854

Quadro 4.4 – Média do R^2 em função da temperatura para as extensões dos mastiques betuminosos

	Procedimento 1	Procedimento 2	Procedimento 3
	R^2	R^2	R^2
5 °C	0,953	0,953	0,955
15 °C	0,944	0,940	0,941
25 °C	0,923	0,923	0,924

Realizou-se ainda a média total da correlação para o ajustamento da tensão e extensão em relação a cada procedimento, podendo-se ver nos quadros 4.5 e 4.6 que não existe grandes diferenças na correlação dada pelos diferentes procedimentos, sendo que os Procedimento 1 e 3 apresentam muito ligeiramente melhor média de correlação. Da observação das tabelas abaixo há ainda a registar que o ajustamento das extensões oferece uma maior correlação do que o ajustamento das tensões.

Quadro 4.5 – Média total do R^2 para a tensão dos mastiques betuminosos

	Procedimento 1 e 3	Procedimento 2
R^2	0,904	0,897

Quadro 4.6 – Média total do R^2 para a extensão dos mastiques betuminosos

	Procedimento 1	Procedimento 2	Procedimento 3
R^2	0,940	0,939	0,940

Analisando os gráficos (Figuras 4.2 e 4.3) e com base nos quadros pode-se ver que para o ajustamento às tensões a correlação entre a série de dados experimentais e a série de dados esperada aumenta com a redução até à frequência de 0,1 HZ, e começa a diminuir ligeiramente nas seguintes frequências mais baixas. Em relação ao ajustamento das extensões verifica-se um aumento gradual da correlação com a diminuição da frequência, e apenas na frequência mais baixa se regista uma diminuição da correlação. Pode ver-se que pelos gráficos que a abaixo da frequência de 2 Hz se obtém sempre valores com uma correlação acima de 0,9, significando isso uma boa correlação para essas frequências. Pode igualmente ver-se nas Figuras 4.4 e 4.5 que tanto para as equações da tensão e da extensão se verifica uma diminuição da qualidade do ajuste aos dados na presença de temperaturas mais elevadas.

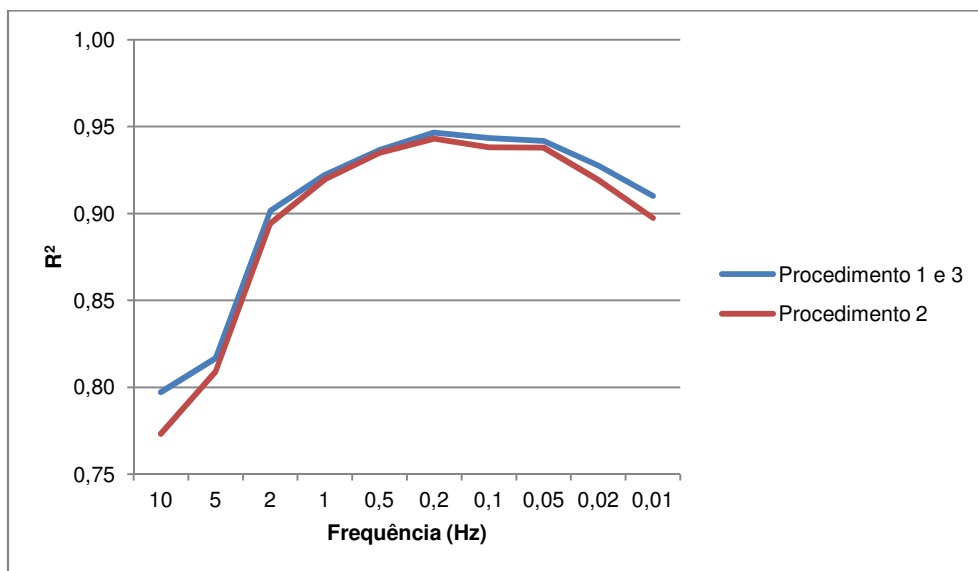


Figura 4.5 – Gráfico da média do R^2 para a tensão do mastique betuminoso em função da frequência

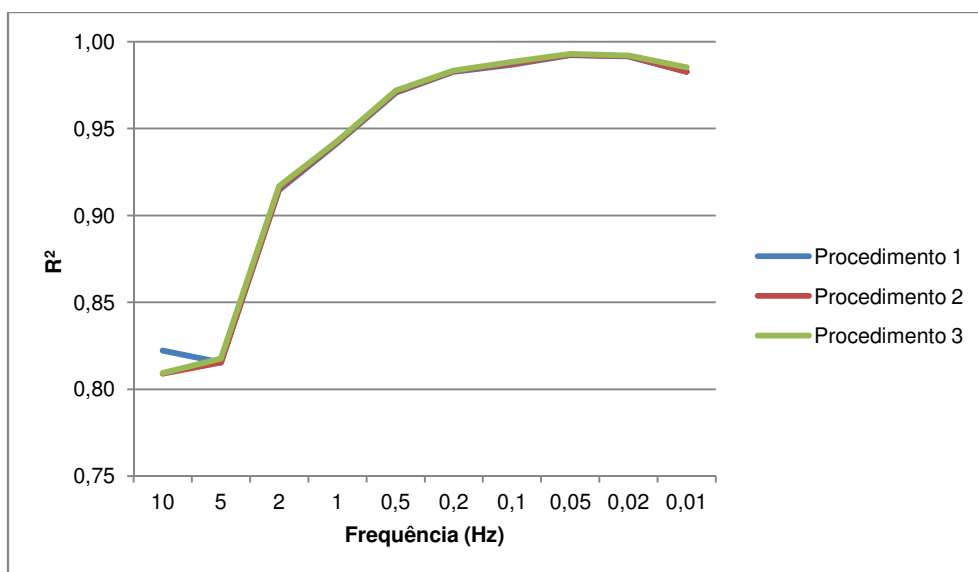


Figura 4.6 – Gráfico da média do R^2 para a extensão do mastique betuminoso em função da frequência

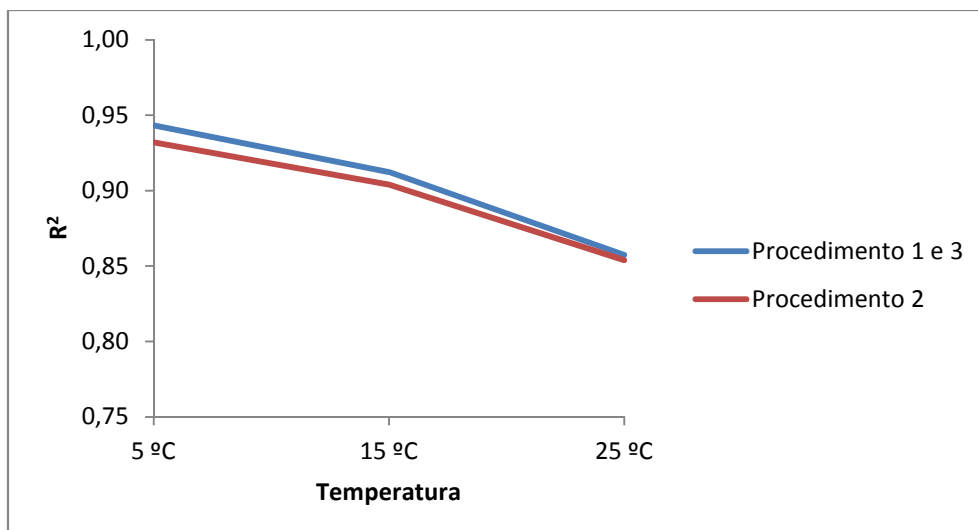


Figura 4.7 – Gráfico do R^2 em função da temperatura para a tensão do mastic betuminoso

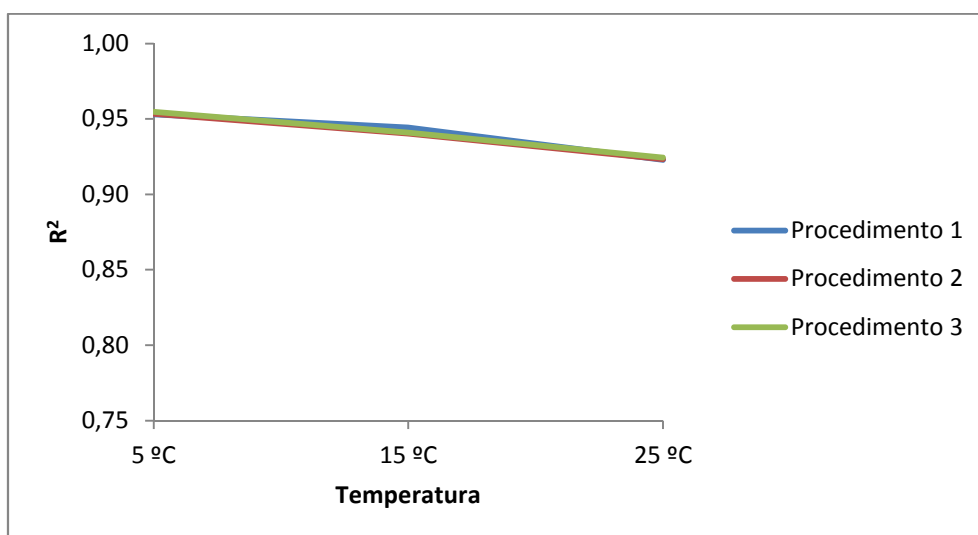


Figura 4.8 – Gráfico do R^2 em função da temperatura para a extensão do mastic betuminoso

Apresentam-se ainda a comparação das correlações dos gráficos através de gráficos de igualdade em função das médias de correlação para cada frequência, de modo a ser mais fácil perceber qual dos procedimentos melhor se ajustou à série de dados em estudo. Sendo que no gráfico da Figura 4.6 se pode observar que os valores estimados para a tensão para a regressão proposta para o Procedimento 1 e 3 apresentam uma maior correlação do que os valores estimados pela regressão utilizada no Procedimento 2. Em relação à extensão pode observar-se nos gráficos das Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 que a correlação dos valores estimados entre os diferentes procedimentos não apresenta grandes variações, podendo ser considerados equivalentes.

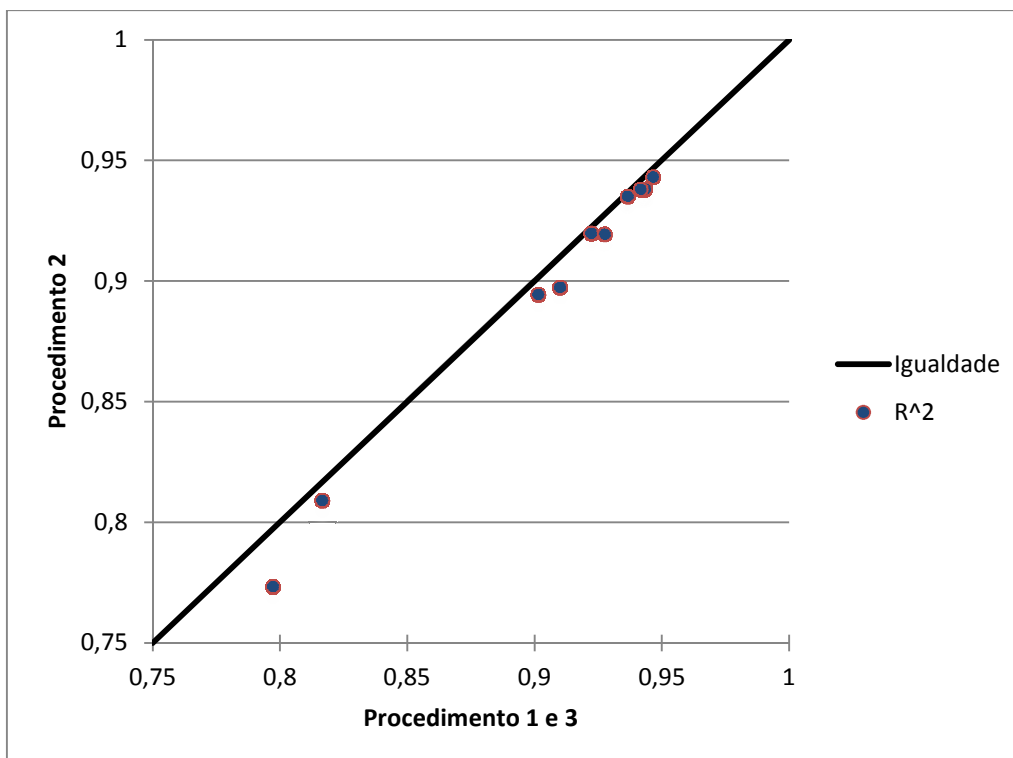


Figura 4.9 – Gráfico de igualdade da média do R^2 para a tensão do mastique betuminoso em função da frequência

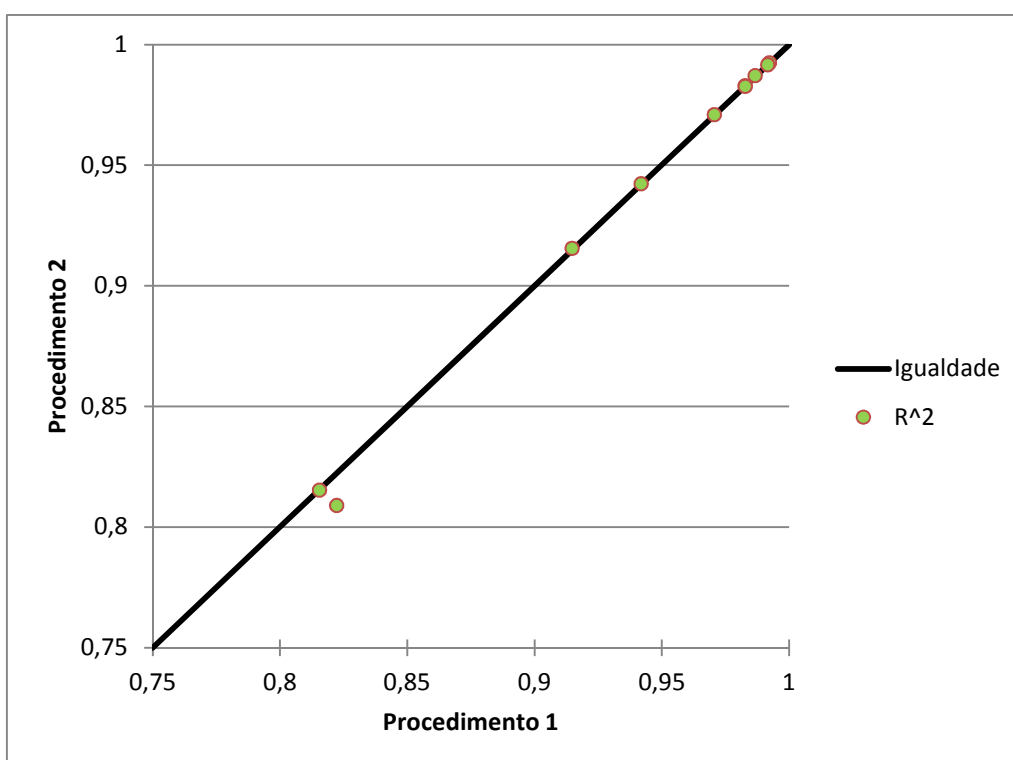


Figura 4.10 – Gráfico de igualdade da média do R^2 para a extensão do mastique betuminoso em função da frequência para comparação entre o Procedimento 1 e o Procedimento 2

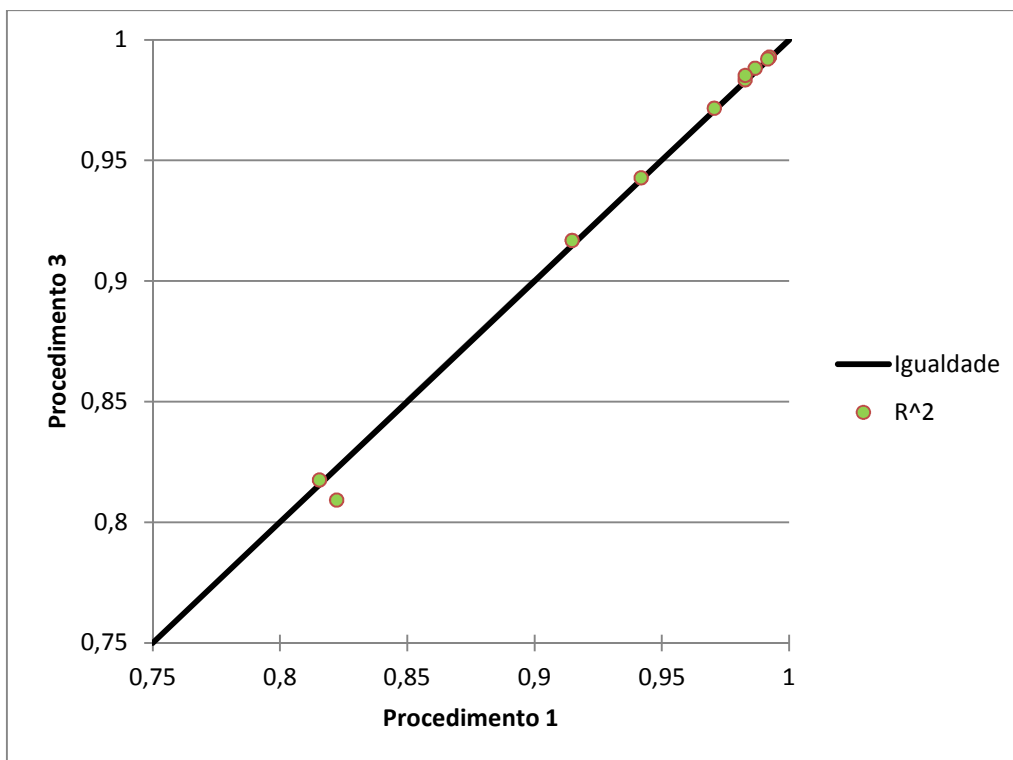


Figura 4.11 – Gráfico de igualdade da média do R^2 para a extensão do mastique betuminoso em função da frequência para comparação entre o Procedimento 1 e o Procedimento 3

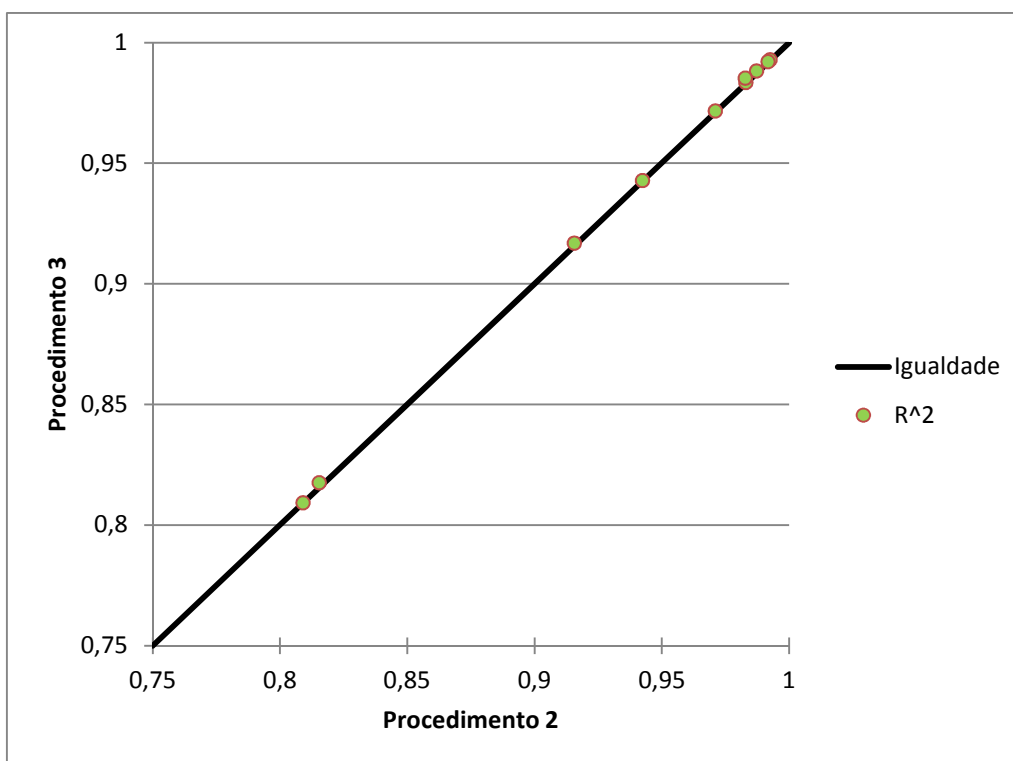


Figura 4.12 – Gráfico de igualdade da média do R^2 para a extensão do mastique betuminoso em função da frequência para comparação entre o Procedimento 1 e o Procedimento 3

Em relação às misturas betuminosas pode-se ver nos Quadros 4.7 e 4.8, onde se apresenta a média da correlação dos dados em função da sequência, que para as frequências mais altas tem-se uma correlação bastante maior do que quando comparando com os valores do mastique betuminoso, tal deve-se ao facto de, como já foi referido, apenas se ter um intervalo dos dados para as frequências 10 Hz, 5 Hz, 2 Hz e 1 Hz.

Quadro 4.7 – Média do R^2 por frequência para as tensões das misturas betuminosas

	Procedimento 1 e 3	Procedimento 2
	R^2	R^2
10 Hz	0,982	0,981
5 Hz	0,978	0,977
2 Hz	0,967	0,969
1 Hz	0,967	0,966
0,5 Hz	0,973	0,971
0,2 Hz	0,983	0,981
0,1 Hz	0,986	0,981
0,05 Hz	0,981	0,978
0,02 Hz	0,986	0,976

Quadro 4.8 – Média do R^2 por frequência para as extensões das misturas betuminosas

	Procedimento 1	Procedimento 2	Procedimento 3
	R^2	R^2	R^2
10 Hz	0,969	0,969	0,969
5 Hz	0,965	0,965	0,965
2 Hz	0,965	0,965	0,966
1 Hz	0,970	0,970	0,970
0,5 Hz	0,980	0,980	0,981
0,2 Hz	0,991	0,991	0,992
0,1 Hz	0,993	0,994	0,994
0,05 Hz	0,996	0,994	0,996
0,02 Hz	0,996	0,996	0,996

Estudou-se também a influência da temperatura na qualidade do ajuste tendo sido obtidos os seguintes valores apresentados nos quadros 4.9 e 4.10.

Quadro 4.9 – Média R^2 em função da temperatura para as tensões das misturas betuminosas

	Procedimento 1 e 3	Procedimento 2
	R^2	R^2
5 °C	0,981	0,978
15 °C	0,980	0,979
25 °C	0,973	0,970

Quadro 4.10 – Média R^2 em função da temperatura para as extensões das misturas betuminosas

	Procedimento 1	Procedimento 2	Procedimento 3
	R^2	R^2	R^2
5 °C	0,983	0,984	0,984
15 °C	0,983	0,982	0,983
25 °C	0,976	0,976	0,976

Apresenta-se nos quadros 4.11 e 4.12 a média total da correlação para o ajustamento da tensão e extensão em relação a cada procedimento. Ao contrário do ajuste aos dados do mastique betuminoso, no Procedimento 1 a correlação é ligeiramente melhor para o ajuste às tensões do que às extensões, apesar de que para os restantes procedimentos continua-se a registar uma melhor correlação no ajuste das extensões do que nas tensões. Apesar de ser uma diferença mínima, o Procedimento 1 e 3 apresentam uma melhor correlação no ajuste aos dados experimentais da tensão em relação ao Procedimento 2, enquanto no ajuste aos dados das extensões são os procedimentos 2 e 3 que apresentam uns melhores valores de correlação.

Quadro 4.11 – Média total do R^2 das tensões dos mastiques betuminosos

	Procedimento 1 e 3	Procedimento 2
R^2	0,978	0,975

Quadro 4.12 – Média total do R^2 das extensões dos mastiques betuminosos

	Procedimento 1	Procedimento 2	Procedimento 3
R^2	0,975	0,981	0,981

Observando os gráficos das Figuras 4.10 e 4.11, e com base nas tabelas acima, pode-se perceber que para o ajuste aos valores experimentais das tensões são quase sempre superiores para os procedimentos 1 e 3, e para o ajuste às extensões o Procedimento 3 é, apesar de com diferenças muito pouco reduzidas ou em alguns casos nulas, o melhor ajuste para todas as frequências. Pode ainda ver-se pelo gráfico da Figura 4.9 que para o ajuste das extensões a correlação mostra um padrão de aumento com a redução da frequência, caso que não se pode concluir para o ajuste das tensões, visto que como se pode ver no gráfico da Figura 4.8, a correlação começa por diminuir, seguida de um aumento e novamente uma diminuição da correlação em relação à redução da frequência. Nas figuras 4.12 e 4.13 referentes à qualidade do ajuste em função da temperatura pode ver-se que tal como para o mastique betuminoso, também para as

misturas betuminosas se verifica um decréscimo da qualidade com o aumento da temperatura.

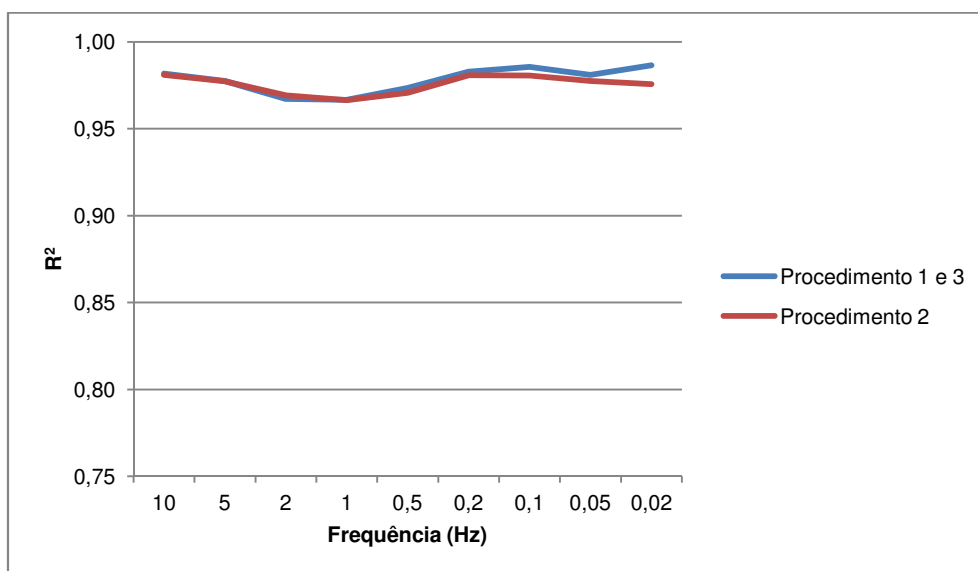


Figura 4.13 – Gráfico da média do R^2 para a tensão da mistura betuminosa em função da frequência

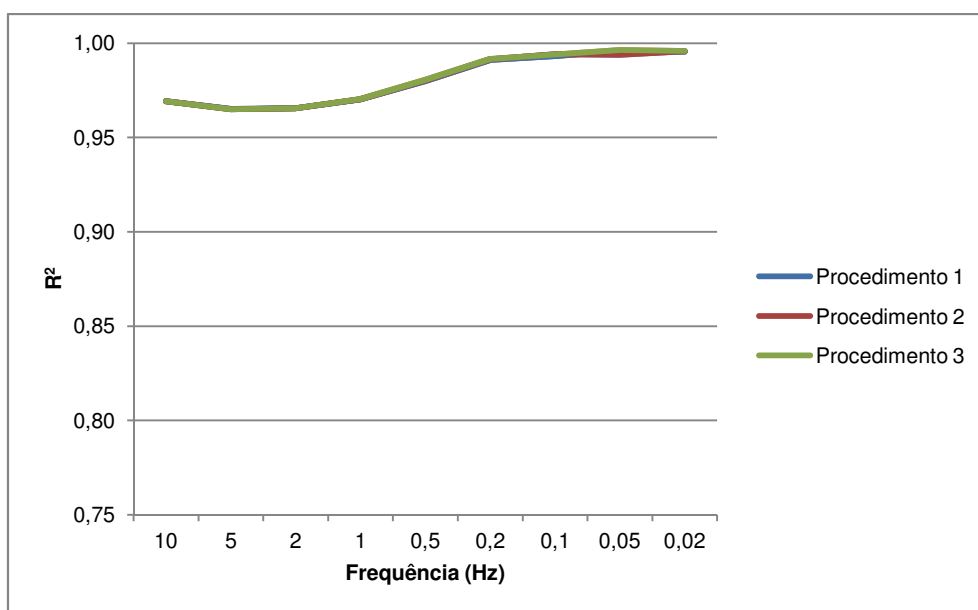


Figura 4.14 – Gráfico da média do R^2 para a extensão da mistura betuminosa em função da frequência

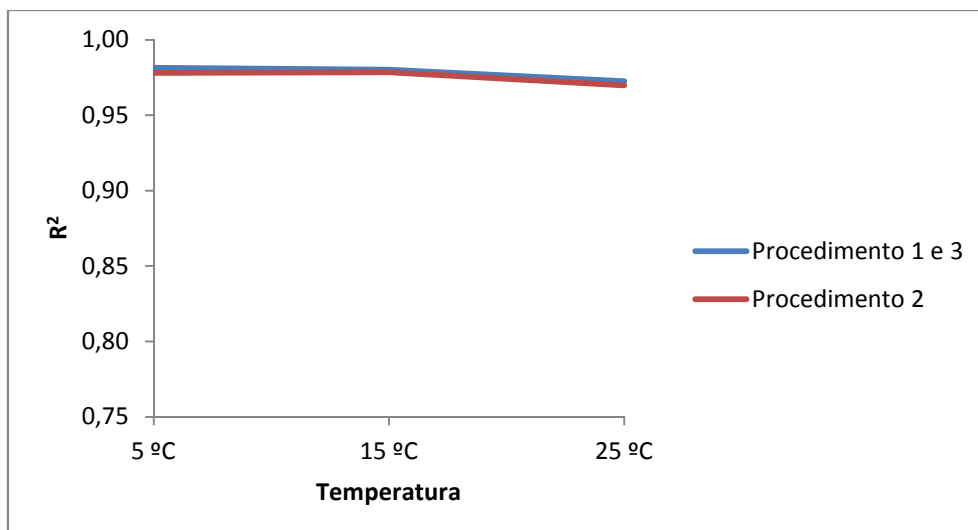


Figura 4.15 – Gráfico do R^2 em função da temperatura para a tensão da mistura betuminosa

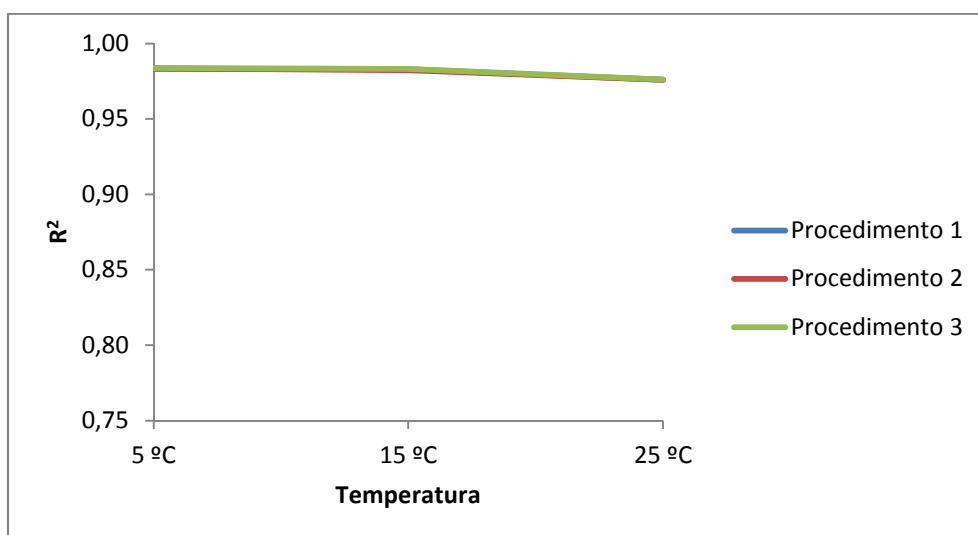


Figura 4.16 – Gráfico do R^2 em função da temperatura para a extensão da mistura betuminosa

Tal como para os dados do mastique betuminoso, apresentam-se ainda a comparação das correlações dos gráficos através de gráficos de igualdade em função das médias de correlação para cada frequência. Na Figura 4.14 pode ser visto claramente que para o ajuste à tensão os procedimentos 1 e 3 apresentam em média uns melhores valores de correlação quando em comparação com o Procedimento 2. No ajuste aos dados das extensões, analisando os gráficos presentes nas Figuras 4.15, 4.16 e 4.17, pode dizer-se que todos os três procedimentos apresentam uns valores de correlação idênticos para o ajuste aos dados, sendo por isso algo delicado apontar o melhor procedimento para o ajuste das extensões.

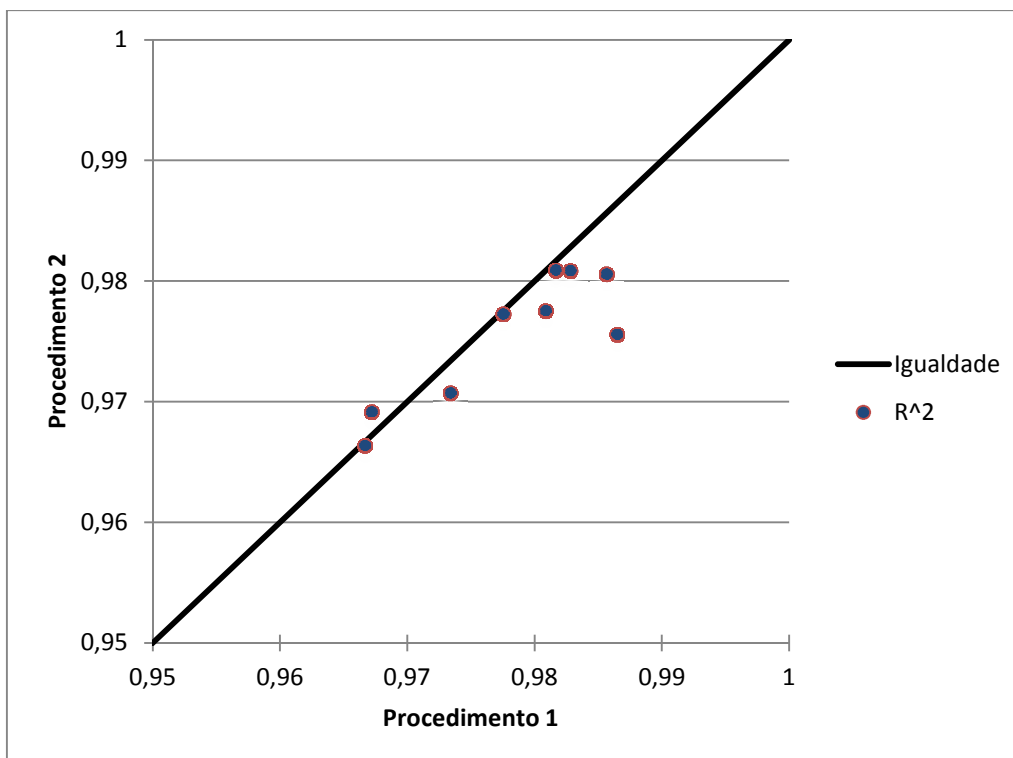


Figura 4.17 – Gráfico de igualdade da média do R^2 para a tensão da mistura betuminosa em função da frequência

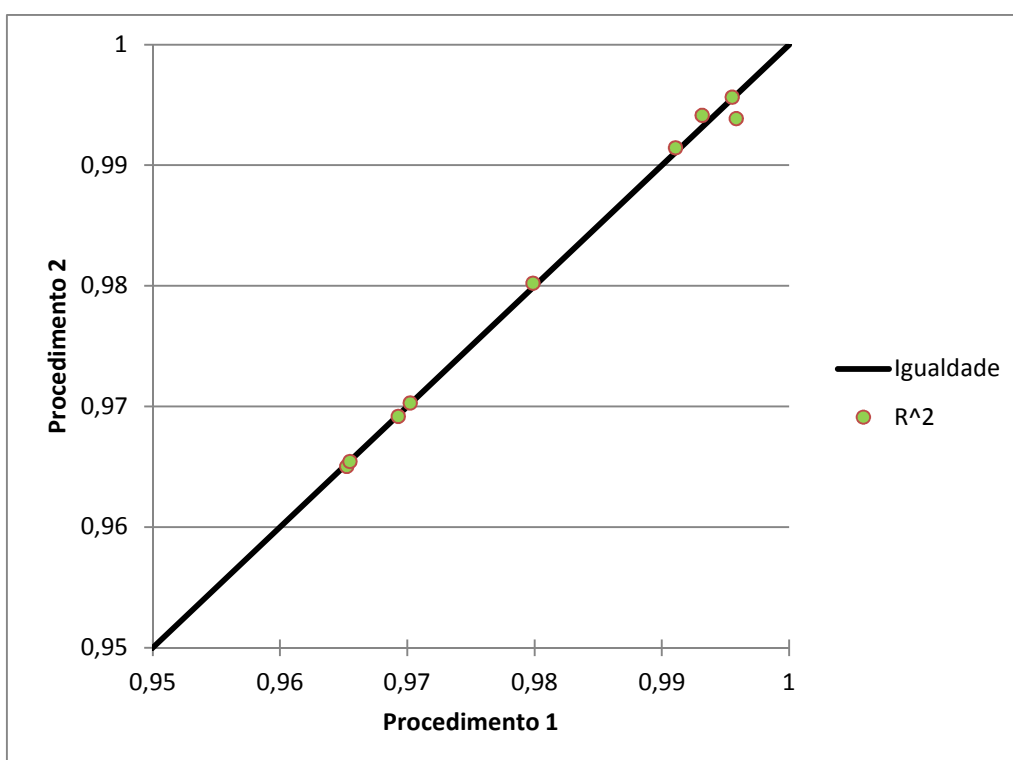


Figura 4.18 – Gráfico de igualdade da média do R^2 para a extensão da mistura betuminosa em função da frequência para comparação entre o Procedimento 1 e o Procedimento 2

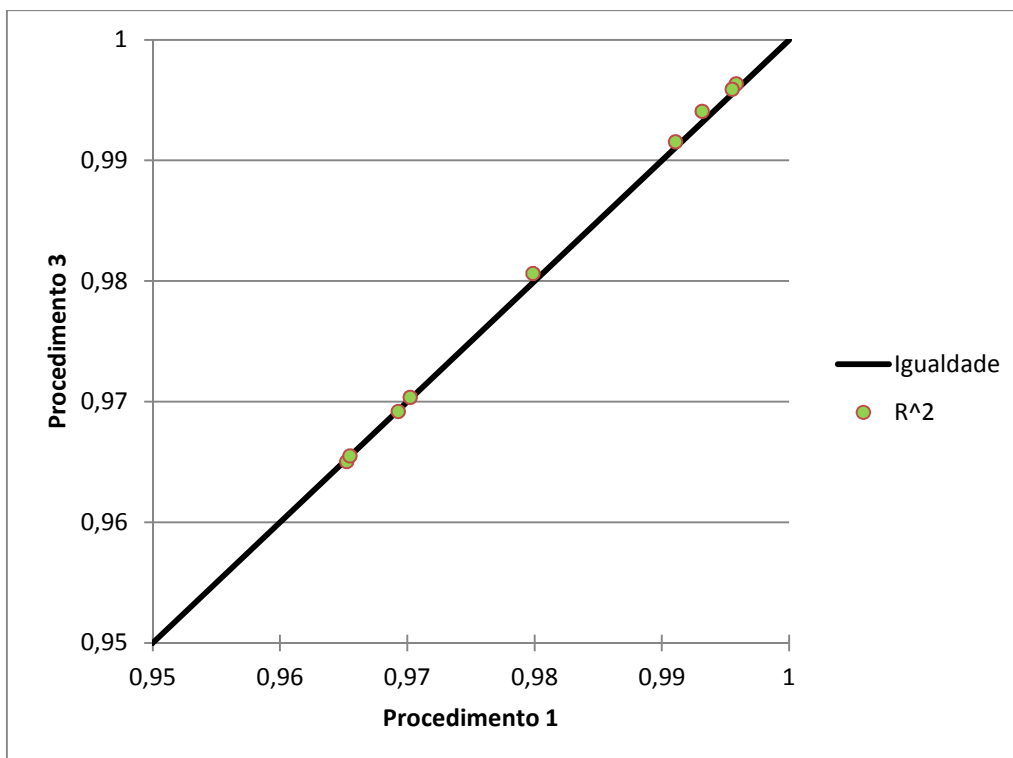


Figura 4.19 – Gráfico de igualdade da média do R^2 para a extensão da mistura betuminosa em função da frequência para comparação entre o Procedimento 1 e o Procedimento 3

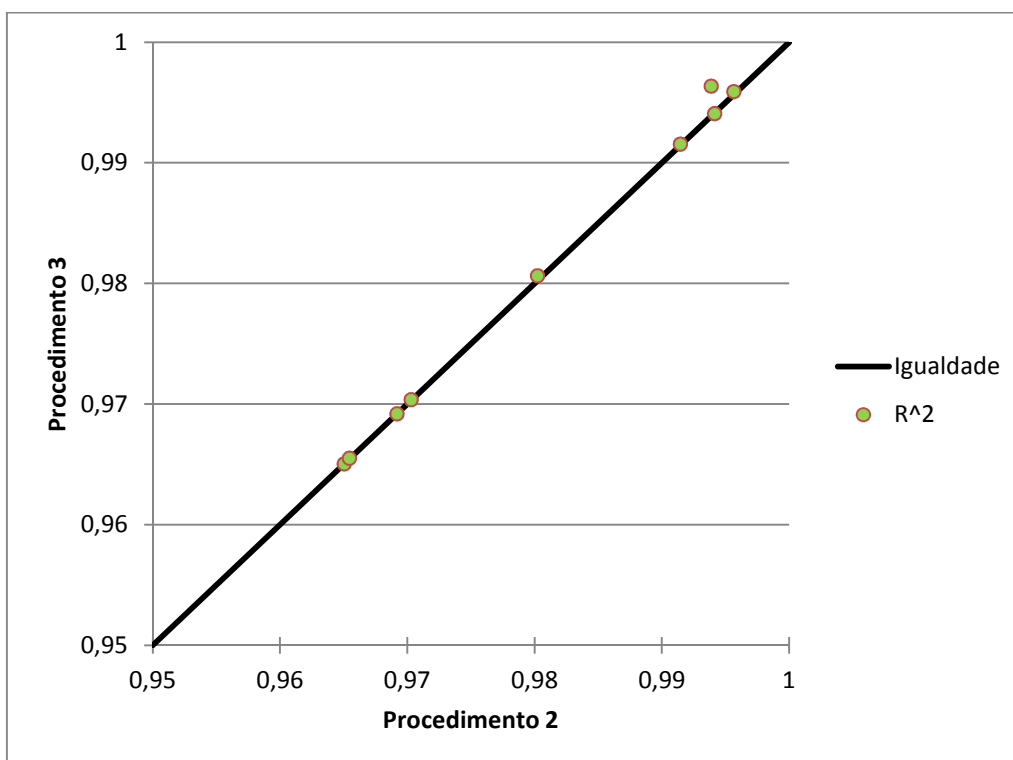


Figura 4.20 – Gráfico de igualdade da média do R^2 para a extensão da mistura betuminosa em função da frequência para comparação entre o Procedimento 2 e o Procedimento 3

As grandes diferenças de ajustamento aos dados entre os mastiques e as misturas betuminosas verificam-se nas frequências mais altas, e tal sucede porque para o mastique foi considerado a totalidade dos dados enquanto para as misturas betuminosas apenas se considerou um intervalo de dados. Para comprovar esse facto apresenta-se o quadro 4.13, onde se pode observar um exemplo onde utilizando um intervalo de ciclos menor nos dados do mastique para as 4 frequências mais elevadas, se obtém um melhor ajustamento em relação à utilização dos dados completos.

Quadro 4.13 – Exemplo da influência do número de ciclos no ajustamento de dados

Frequência (Hz)	Total		Intervalo	
	R2 σ	R2 ϵ	R2 σ	R2 ϵ
10,0	0,89	0,87	0,96	0,96
5,0	0,88	0,88	0,94	0,95
2,0	0,86	0,87	0,91	0,91
1,0	0,92	0,93	0,92	0,94
0,5	0,94	0,96	0,94	0,96
0,2	0,94	0,99	0,94	0,99
0,1	0,94	0,99	0,94	0,99
0,05	0,93	0,99	0,93	0,99
0,02	0,92	0,99	0,92	0,99
0,01	0,92	1,00	0,92	1,00

Apesar de um melhor ajustamento, as diferenças nos valores dos módulos de rigidez e ângulo de fase não são significativos, como se pode ver nos gráficos 4.18 e 4.19.

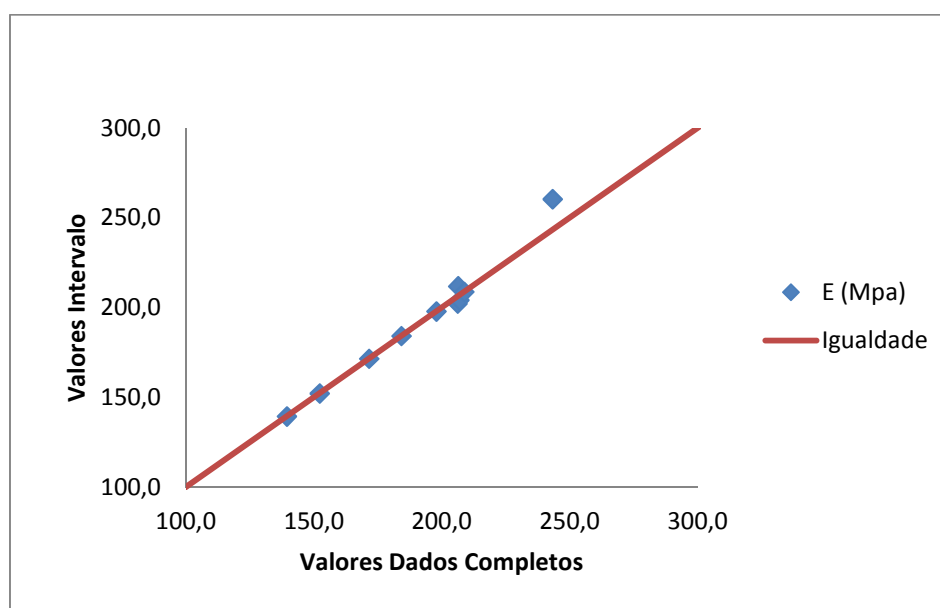


Figura 4.21 – Gráfico de igualdade entre análise dos dados completos e intervalo de dados para o módulo de rigidez

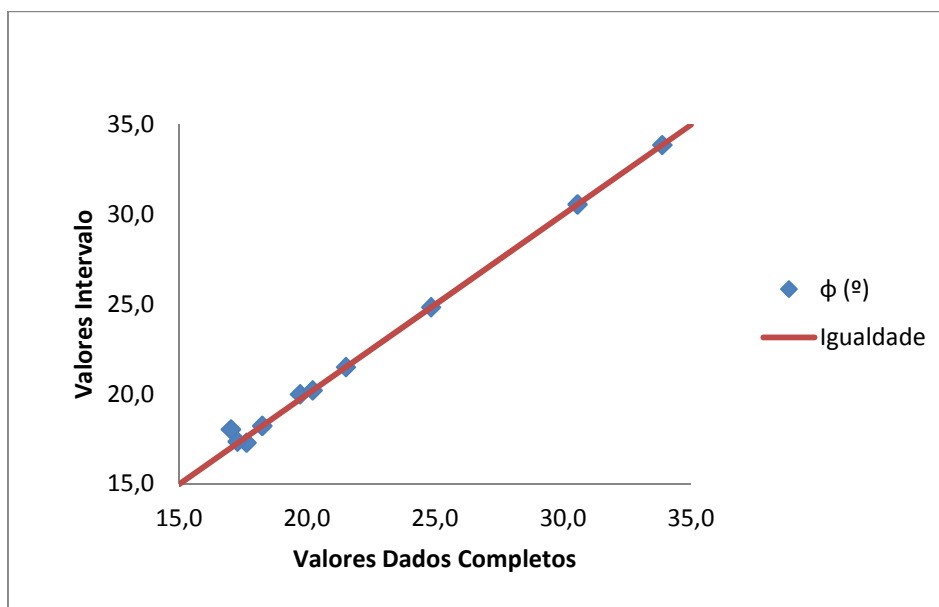


Figura 4.22 – Gráfico de igualdade entre análise dos dados completos e intervalo de dados para o ângulo de fase

Depois de aferir a qualidade do ajuste procedeu-se então ao cálculo do módulo de rigidez e do ângulo de fase utilizando a formulação indicada na secção anterior, comparando esses valores entre os diferentes procedimentos através de gráficos de igualdade.

Nas Figuras 4.20, 4.21 e 4.22 apresentam-se os gráficos de comparação dos módulos de rigidez dos mastiques betuminosos calculados através dos diferentes procedimentos definidos. Como se pode verificar nos gráficos, os valores de módulo de rigidez estimados pelos três procedimentos definidos situam-se em cima da linha de igualdade ou muito próximo delas, o que indica que os três procedimentos instalados fornecem valores muito semelhantes independente do procedimento utilizado no ajuste dos dados. Mesmo que os valores não fossem semelhantes não se poderia dizer que um procedimento seria melhor que o outro, pois para isso seria necessário ter como referência dados considerados óptimos.

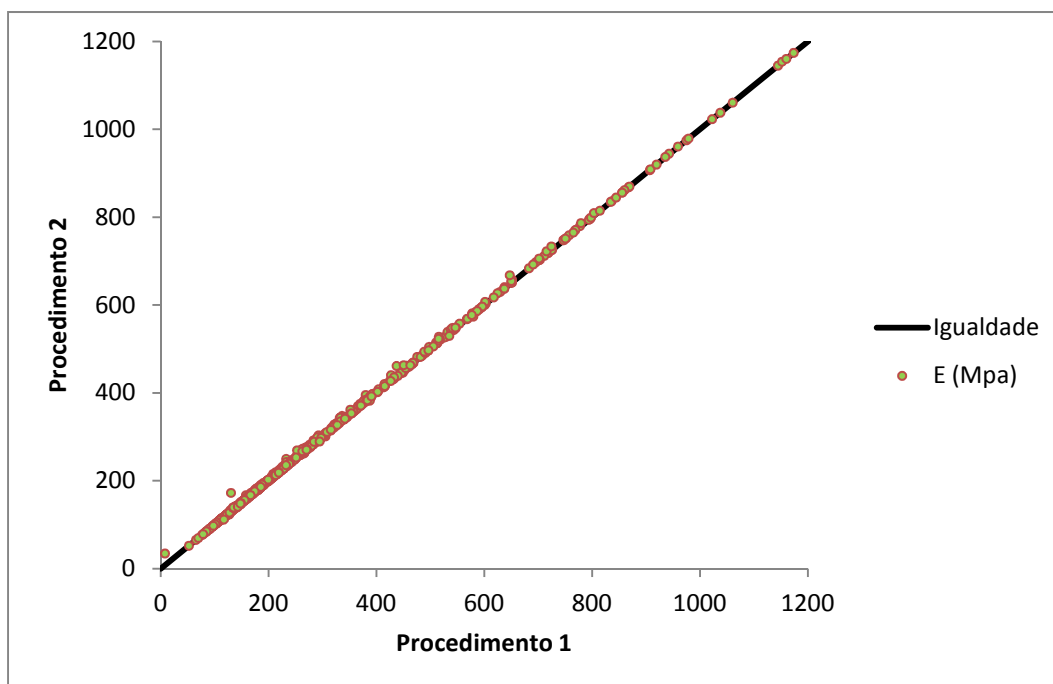


Figura 4.23 – Gráfico de igualdade para o módulo de rigidez da mastique betuminoso para comparação entre o Procedimento 1 e o Procedimento 2

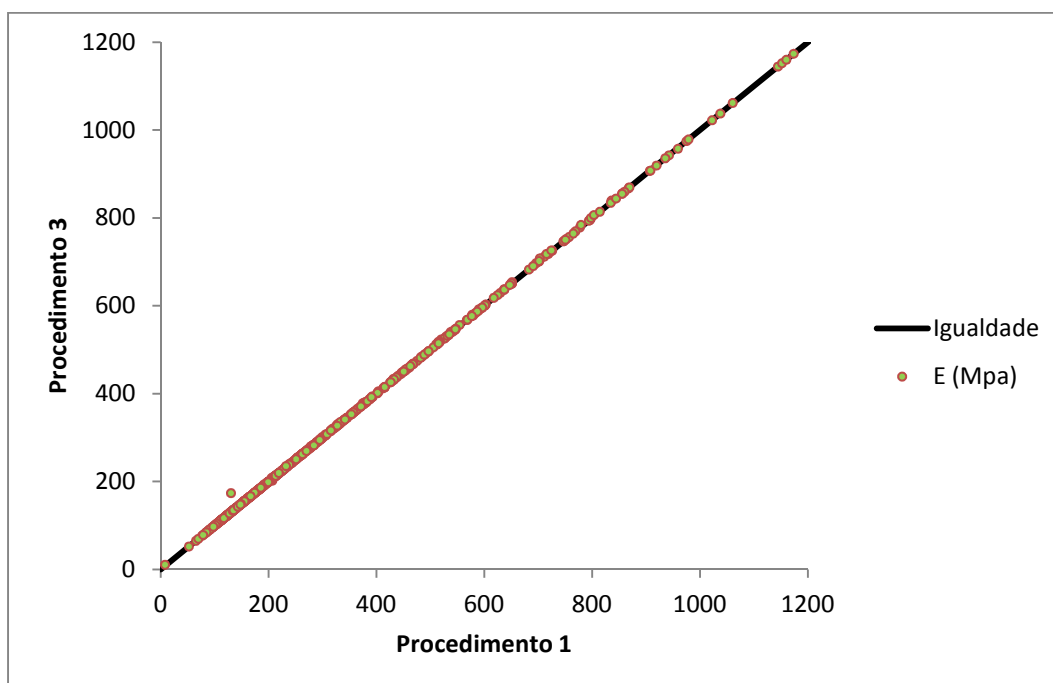


Figura 4.24 – Gráfico de igualdade para o módulo de rigidez da mastique betuminoso para comparação entre o Procedimento 1 e o Procedimento 3

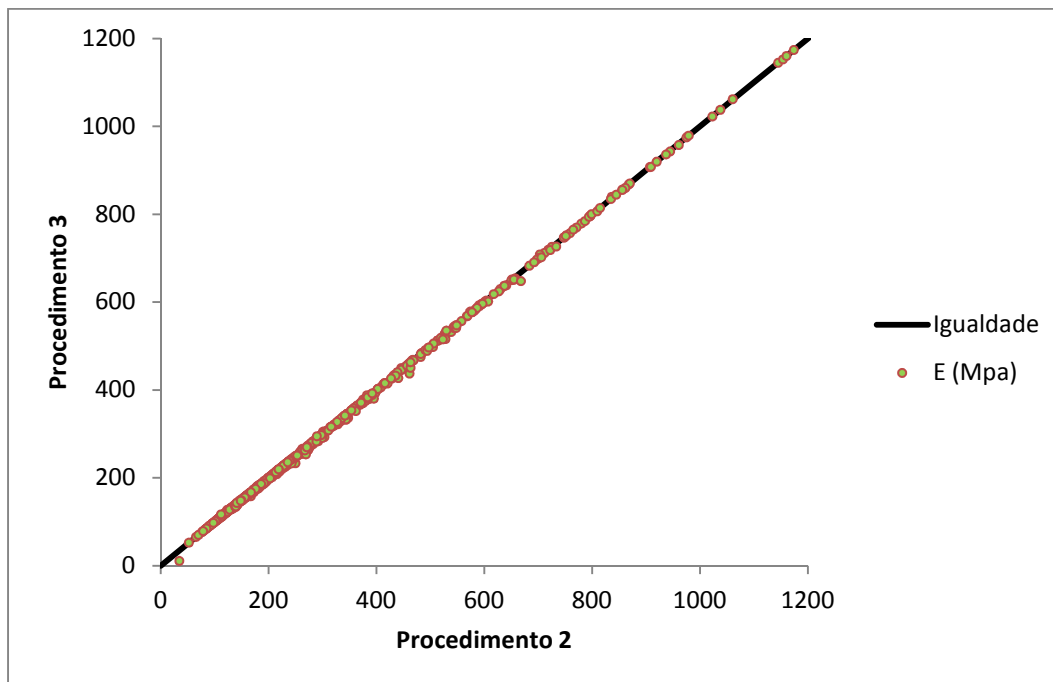


Figura 4.25 – Gráfico de igualdade para o módulo de rigidez da mastique betuminoso para comparação entre o Procedimento 2 e o Procedimento 3

Apresentam-se agora nas figuras 4.23, 4.24 e 4.25 os valores dos ângulos de fase do mastique betuminoso calculados para os três procedimentos. Tal como para os valores de módulo de rigidez, também os valores de ângulo de fase estimados através dos procedimentos se situam maioritariamente sobre linha de igualdade, indicativo de valores muito próximos entre os diferentes procedimentos. Apesar disso pode-se ver pelos gráficos que o Procedimento 1 e o Procedimento 3 têm tendência a dar valores superiores de ângulos de fase em relação ao Procedimento 2.

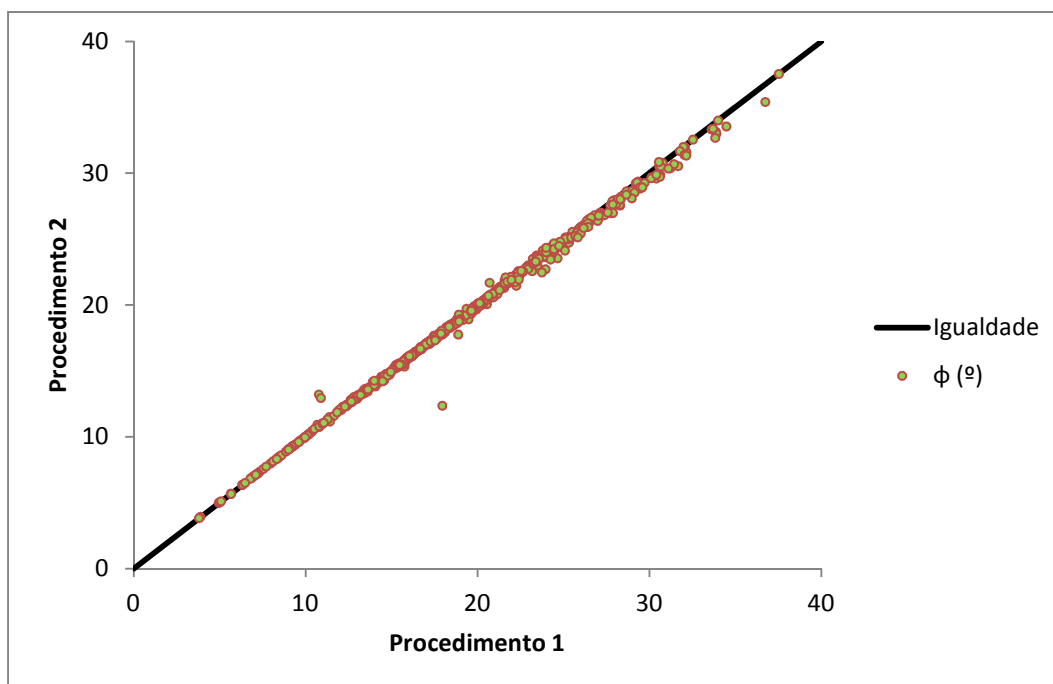


Figura 4.26 – Gráfico de igualdade para o ângulo de fase da mastique betuminoso para comparação entre o Procedimento 1 e o Procedimento 2

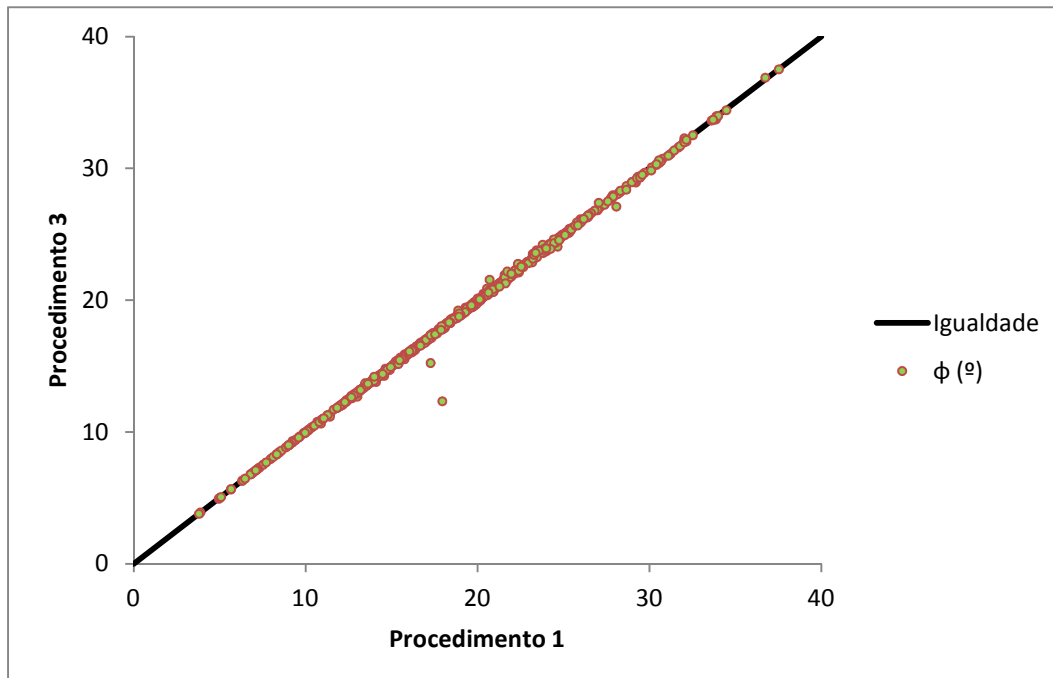


Figura 4.27 – Gráfico de igualdade para o ângulo de fase da mastique betuminoso para comparação entre o Procedimento 1 e o Procedimento 3

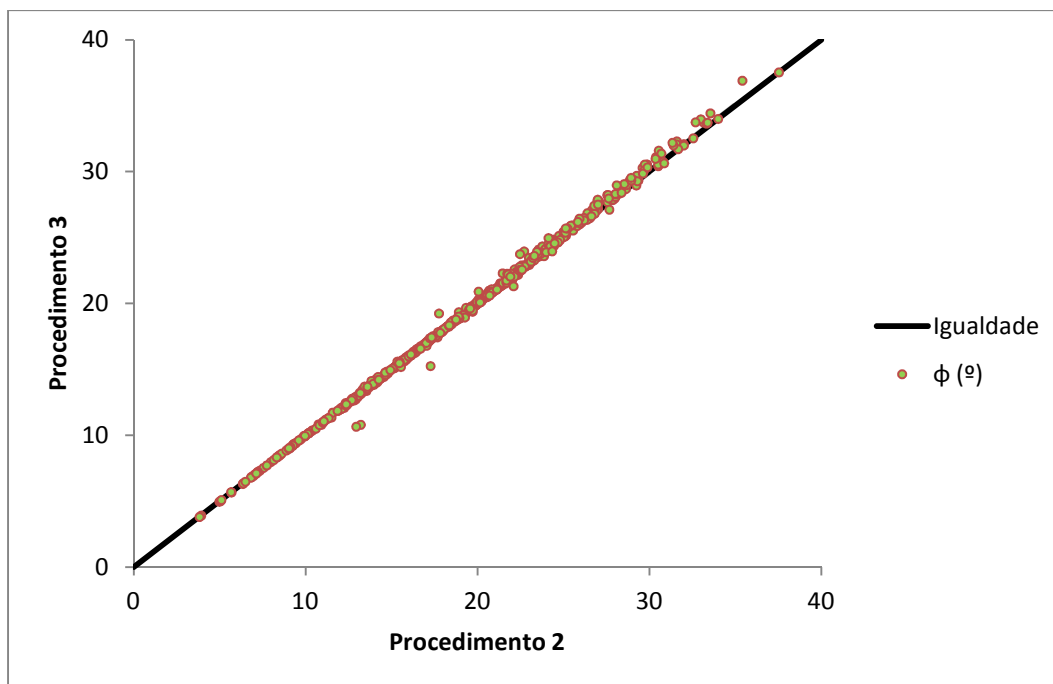


Figura 4.28 – Gráfico de igualdade para o ângulo de fase da mastique betuminoso para comparação entre o Procedimento 2 e o Procedimento 3

Para o módulo de rigidez das misturas betuminosas apresentam-se os gráficos das Figuras 4.26, 4.27 e 4.28 onde se comparam os valores obtidos pelos diferentes procedimentos, e como se pode ver, os valores estimados situam-se em muito perto da linha de igualdade, indicando que os valores obtidos pelos procedimentos são muito próximos.

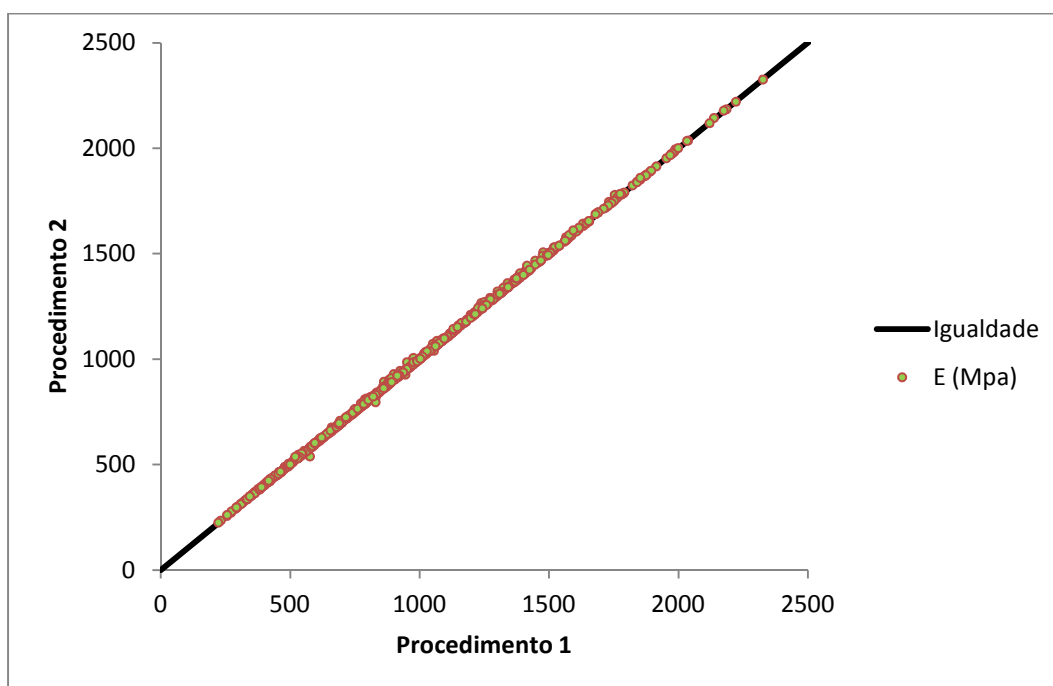


Figura 4.29 – Gráfico de igualdade para o módulo de rigidez da mistura betuminosa para comparação entre o Procedimento 1 e o Procedimento 2

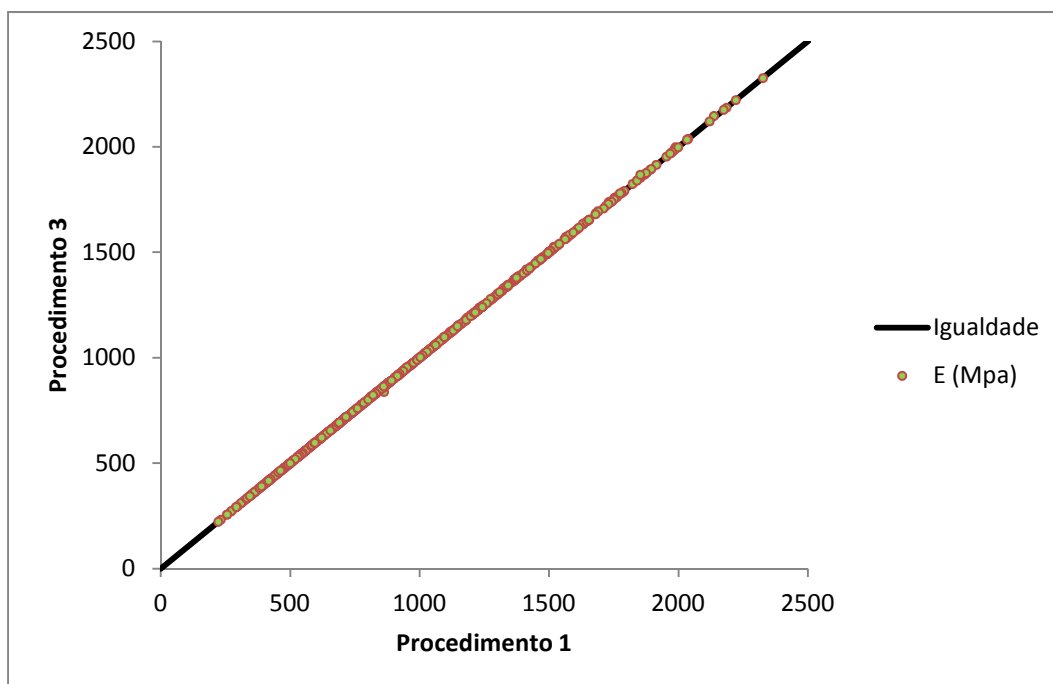


Figura 4.30 – Gráfico de igualdade para o módulo de rigidez da mistura betuminosa para comparação entre o Procedimento 1 e o Procedimento 3

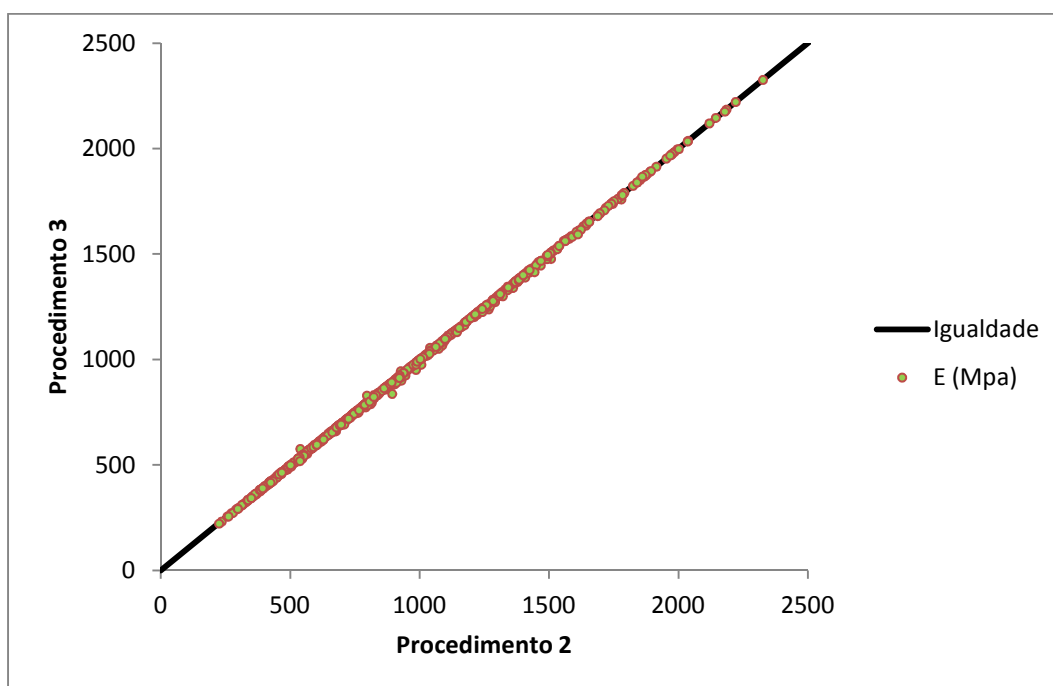


Figura 4.31 – Gráfico de igualdade para o módulo de rigidez da mistura betuminosa para comparação entre o Procedimento 2 e o Procedimento 3

Também para os valores de ângulo de fase das misturas betuminosas acontece aproximadamente o mesmo do que para os valores do mastique, como se pode ver nas figuras 4.29, 4.30 e 4.31, os valores estimados situam-se muito próximos da linha de igualdade para os diferentes procedimentos.

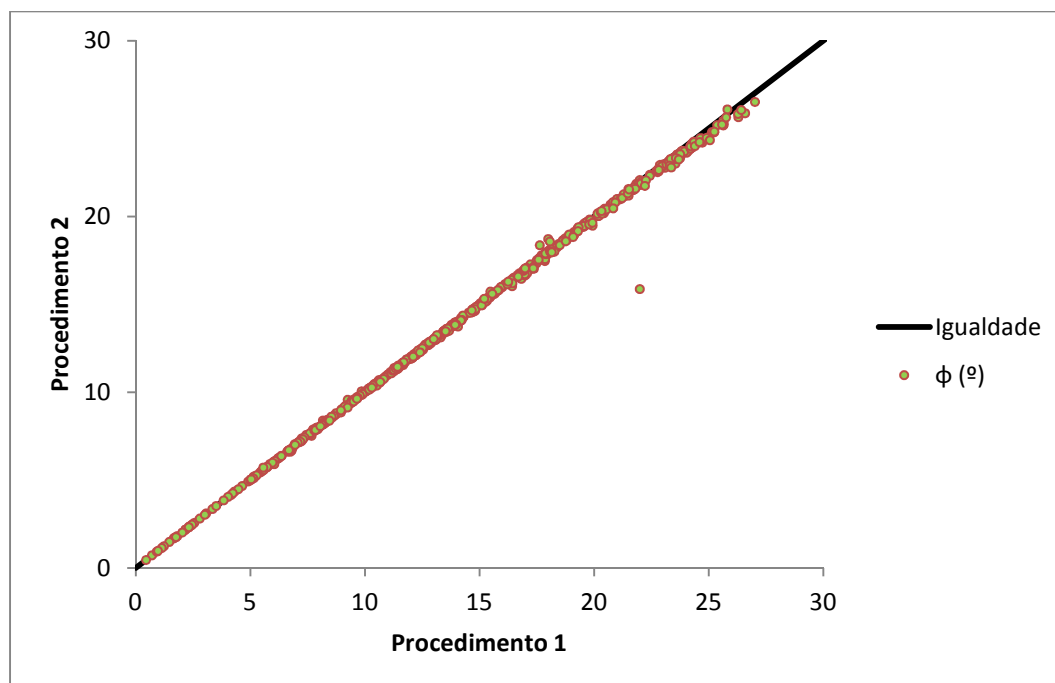


Figura 4.32 – Gráfico de igualdade para o ângulo de fase da mistura betuminosa para comparação entre o Procedimento 1 e o Procedimento 2

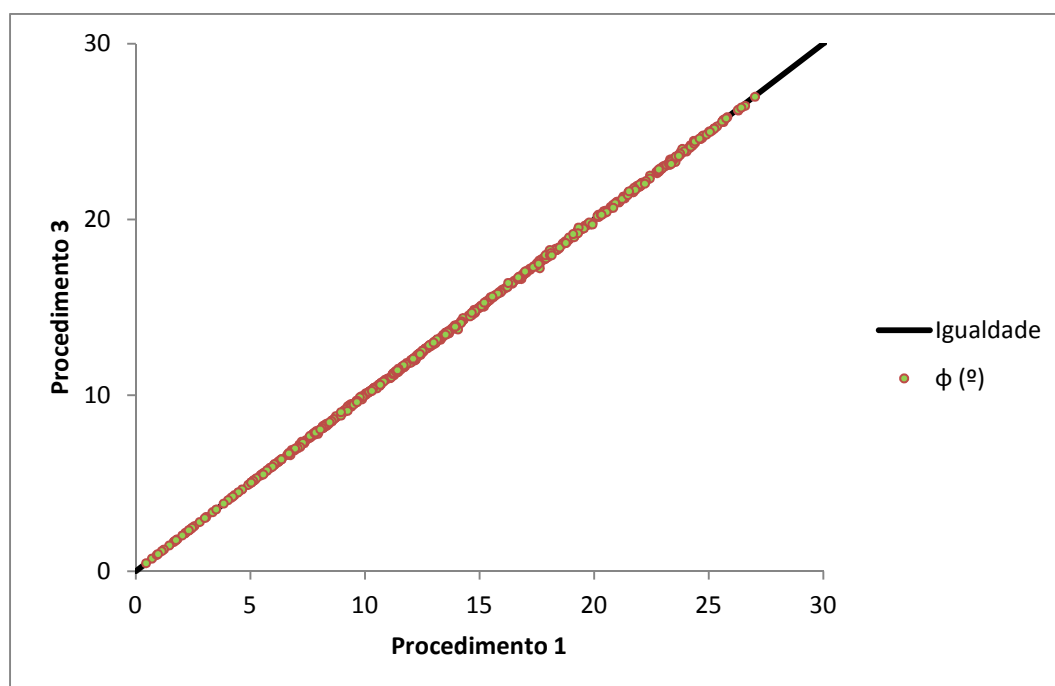


Figura 4.33 – Gráfico de igualdade para o ângulo de fase da mistura betuminosa para comparação entre o Procedimento 1 e o Procedimento 3

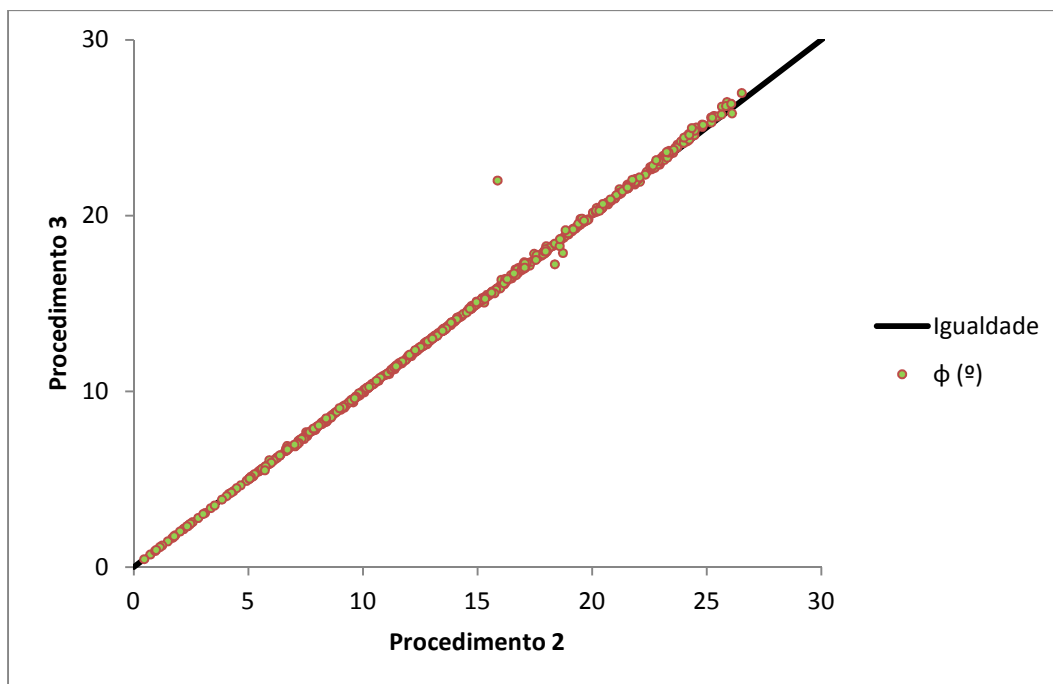


Figura 4.34 – Gráfico de igualdade para o ângulo de fase da mistura betuminosa para comparação entre o Procedimento 2 e o Procedimento 3

Em anexo apresentam-se todos os valores de módulo de rigidez e de ângulo de fase calculados no presente trabalho referentes aos provetes de mastique betuminoso e mistura betuminosa.

4.6 Conclusões

Observando os resultados no presente capítulo pode afirmar-se que a uma frequência mais baixa se obtém um melhor ajustamento aos dados fornecidos, o que faz sentido, visto que um menor número de ciclos está menos propício a sofrer perturbações e é também mais fácil de ser ajustado a uma equação. Pode também dizer-se que quanto maior a temperatura, pior ajustamento se obtém, pois a temperaturas elevadas as misturas betuminosas deixam de responder tão uniformemente como a temperaturas baixas.

Comparando os três procedimentos não houve grandes diferenças em relação à qualidade do ajuste das funções, apresentando todos os procedimentos valores semelhantes.

Em relação ao cálculo dos valores do ângulo de fase e do módulo de rigidez também não se verificaram discrepâncias significativas entre os diferentes procedimentos, apresentando os três procedimentos valores praticamente iguais entre si, sendo que para os procedimentos 1 e 3 é onde se obtém maior igualdade.

Capítulo 5

Conclusões

5.1 Síntese do Trabalho e Conclusões

O estudo do comportamento dos pavimentos rodoviários é importante para se prever que comportamento determinado pavimento rodoviário tem em serviço. O módulo de rigidez e o ângulo de fase são utilizados como indicadores do comportamento das misturas betuminosas.

No presente trabalho analisaram-se os procedimentos apresentados por *Liu et al.* (2010) para o pós-processamento em ensaios de determinação do módulo de rigidez, estudando a qualidade de ajuste a dados experimentais de ensaios de compressão/tracção repetida em provetes de mastique betuminoso e misturas betuminosas, e posterior cálculo do módulo de rigidez para esses mesmos provetes.

A metodologia de ajuste aos dados teve como base os modelos de equação apresentada por *Liu et al.*, onde se definiram três procedimentos, fazendo uma regressão com o auxílio do programa *Wolfram Mathematica*. Para avaliar a qualidade de ajuste das equações obtidas aos dados experimentais foi calculado o coeficiente de correlação entre ambos.

Com o valor dos coeficientes de correlação calculados foi possível fazer uma análise da qualidade do ajuste com a variação da frequência. Concluiu-se dessa análise que as frequências mais baixas tendem a ter um valor mais alto de coeficiente de correlação, o que indica uma melhor qualidade do ajuste das equações obtidas. Tal facto explica-se devido ao menor número de ciclos que as frequências mais baixas apresentam, e com menos ciclos menos variações nos dados e consequentemente a melhor qualidade do ajuste obtida.

Analisou-se também como varia a qualidade do ajuste em relação à temperatura, podendo-se verificar que provetes sujeitos a uma temperatura mais baixa têm um maior coeficiente de correlação, especialmente no caso dos provetes de mastique betuminoso onde os dados dos provetes ensaiados a 5 °C apresentaram claramente melhor qualidade de ajuste. No caso das misturas betuminosas a qualidade do ajuste obtida para os dados a 5 °C e a 15 °C é superior e constante.

Fez-se ainda uma análise à média total do coeficiente de correlação das equações de tensão e extensão obtidas para cada procedimento, e dessa análise é possível concluir que qualquer um dos três procedimentos definidos fornece uma qualidade de ajuste muito semelhante e de boa qualidade. Concluiu-se também que os valores do coeficiente de

correlação são melhores para as misturas betuminosas do que para os mastiques betuminosos, podendo ser isso explicado pelo facto de nas quatro frequências mais altas dos valores das misturas betuminosas apenas ter-se uma fracção dos dados do ensaio, ao invés de que para o mástico betuminoso tem-se a totalidade dos dados.

Tal como no artigo também no presente trabalho a melhor qualidade do ajuste para a tensão foi obtida pela equação utilizada nos Procedimentos 1 e 3, o que já não aconteceu no caso da extensão, que perante valores tão próximos do coeficiente de correlação para os diferentes procedimentos, não se consegue indicar qual o melhor.

Com a análise à qualidade do ajuste feita procedeu-se ao cálculo dos valores do módulo de rigidez e do ângulo de fase para os três procedimentos, comparando os dados entre si. Da comparação dos dados entre os três procedimentos conclui-se que os valores obtidos tanto para o módulo de rigidez como para o ângulo de fase são muito semelhantes, sendo que se torna difícil apontar um procedimento como sendo o melhor.

5.2 Desenvolvimentos Futuros

Para a continuação e melhor estudo dos métodos propostos no artigo em estudo, onde idealmente se prepare provetes nas mesmas condições semelhantes ao descrito no artigo, utilizando equipamento igual ou semelhante no teste de rigidez desses mesmos provetes.

Seguindo assim os procedimentos baseados no artigo, pode então calcular-se os valores esperados com base em quatro transdutores e com todos os dados necessários para a determinação da qualidade dos ajustamentos, tal como feito no artigo, possibilitando assim uma melhor comparação com os resultados presentes no artigo.

O estudo de como a forma dos provetes e os diferentes tipos de equipamento utilizado podem também ser condicionantes que influenciem a qualidade do ajuste, e por essa mesma razão o seu estudo também se pode revelar importante.

Referências Bibliográficas

- BONAQUIST, R. F., CHRISTENSEN, D. W. and STUMP, William - NCHRP Report 513 - Simple Performance Tester for Superpave Mix Design, NCHRP Project 9 – 29 – *First-article Equipment Specifications For The Simple Performance Test System*, 2001.
- BONNAURE, F., GEST, G., GRAVOIS, A. e UGE, P. - *A New Method of Predicting the Stiffness of Asphalt Paving Mixtures*. Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 46, pp. 64-100, 1977.
- BRANCO, F., Pereira, P., Picado Santos, L. - *Pavimentos Rodoviários*. Livraria Almedina, Coimbra, 2008
- CARBONNEAU, Xavier, LEGAL, Yves and QUIGNIOT, Sébastien. - *Modulus measurement: European standardisation possibilities*. Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials, 2009 London pp. 889-897
- CHRISTENSEN, R. M. - *Theory of Viscoelasticity*. Dover Publications, Inc, New York, 1982
- DI BENEDETTO, H. and DE LA ROCHE, C. - *State of the Art on Stiffness Modulus and Fatigue of Bituminous Mixtures*. RILEM Report 17. Bituminous Binders and Mixes. State of Art and Interlaboratory Tests on Mechanical Behaviour and Mix Design. London pp. 69-101, 1998.
- DI BENEDETTO, H., PARTL, M., FRANCKEN, L. and DE LA ROCHE, C. - *Stiffness testing for bituminous mixtures*. Materials and Structures, Vol. 34, pp. 66-70, 2001.
- EN 12697-26, 2004. - *Bituminous mixtures – test methods for hot mix asphalt – part 26: stiffness*. European Standard, European Committee for Standardization (CEN), Brussels.
- LIU, Yu, YOU, Z., WEI, S. W. and MILLS-BEALE, J. – *Postprocessing Method for Dynamic Modulus Tests of Hot-Mix Asphalt*. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2010.
- MALKIN, A. Y., and LSAYEW, A. L. – *Rheology: concepts, methods, and application*, ChemTec Publishing, Ontario, pp. 59-60, 2006.
- NEVES, J. C. M. e GOMES CORREIA, A. - *Caracterização da Rigidez de Misturas Betuminosas em Ensaio de Tração Indirecta por Compressão Diametral de Provetes Cilíndrico*. Engenharia Civil, U.M., nº26, pp. 61-74, 2006.
- SANTOS, Rui – *Análise de Regressão e Séries Temporais: Aplicação ao estudo da evolução e previsão do PIB português*. Lisboa, 2008.
- SILVA, Hugo – *Caracterização do Mastique Betuminoso e da Ligação Agregado-Mastique: Contribuição para o Estudo do Comportamento das Misturas Betuminosas*. Universidade do Minho, 2005.

TSCHOEGL, N. W. – *The phenomenological theory of linear viscoelastic behavior: An Introduction*, Springer-Verlag, Berlin, 1989.

WITCZAK, M. W. e R. E. ROOT - *Summary of Complex Modulus Laboratory Test Procedures and Results*. STP 561, American Society for Testing and Materials, pp. 67-94, 1974.

Anexo A – Resultados Obtidos para os Mastiques Betuminosos

Quadro A.1 – Resultados módulo de rigidez e ângulo de fase dos mastique betuminosos

	Procedimento 1		Procedimento 2		Procedimento 3	
	E (Mpa)	ϕ (°)	E (Mpa)	ϕ (°)	E (Mpa)	ϕ (°)
1_C_6A05	542,9	6,9	543,0	7,0	542,9	6,9
	444,5	10,2	444,8	10,2	444,4	10,2
	412,5	12,1	412,6	12,1	412,5	12,1
	382,4	13,1	383,0	13,2	382,1	13,1
	340,3	15,8	340,2	15,8	341,1	15,8
	305,5	17,3	308,5	17,2	307,2	17,2
	262,5	22,1	265,4	22,0	262,8	22,0
	221,9	24,2	225,0	23,9	221,9	24,2
	177,8	28,3	182,4	27,5	177,7	28,2
	138,0	31,2	142,0	30,4	138,0	31,1
1_C_6A15	243,3	17,6	243,5	17,7	243,3	17,6
	206,4	19,7	206,6	19,7	206,4	19,7
	206,2	17,0	206,3	17,0	206,0	17,0
	206,9	17,3	207,0	17,3	202,1	15,2
	208,8	18,2	209,7	18,3	209,7	18,3
	197,9	20,2	198,9	20,2	198,4	20,2
	184,2	21,5	185,5	21,4	184,3	21,5
	171,6	24,8	173,1	24,7	171,6	24,9
	152,3	30,6	152,3	30,5	152,3	30,4
	139,5	33,9	142,2	33,1	139,5	33,7
1_C_6A25	87,3	19,0	87,3	18,9	87,3	19,0
	122,9	20,6	122,9	20,6	122,9	20,6
	129,2	18,1	129,3	18,1	129,3	18,1
	131,8	19,3	131,8	19,3	131,9	19,3
	143,9	19,0	144,3	19,0	144,5	19,1
	141,2	21,1	142,2	21,1	141,9	21,0
	130,9	22,4	131,4	22,3	131,1	22,3
	128,0	23,3	128,8	23,3	128,0	23,3
	131,5	24,7	132,2	24,7	131,5	24,8
	129,5	26,1	130,0	26,0	129,5	26,0
1_C_6B05	567,8	6,3	567,9	6,4	567,8	6,3
	458,5	9,7	458,8	9,7	458,6	9,7
	453,3	12,4	453,6	12,4	452,9	12,3
	402,9	12,9	403,9	13,0	403,0	12,9
	376,7	15,4	377,3	15,4	377,0	15,4
	318,7	17,2	322,5	17,0	320,0	17,0
	274,7	21,5	278,4	21,3	274,8	21,5
	230,6	24,6	233,7	24,4	230,6	24,6
	175,6	28,3	180,6	27,6	175,5	28,2
	129,6	30,4	133,4	29,6	129,6	30,3
1_C_6B15	228,4	17,0	228,6	17,0	228,4	17,0
	200,7	20,1	200,7	20,1	200,7	20,1
	190,4	18,9	190,2	18,9	190,3	18,9
	184,9	17,8	184,9	17,8	184,9	17,8
	189,9	19,8	191,5	19,9	190,7	19,9
	190,0	19,2	190,5	19,2	190,1	19,2
	171,7	21,6	174,0	21,3	171,9	21,5
	151,3	23,8	152,1	24,1	151,1	24,2
	133,8	30,6	137,0	29,9	133,8	30,6
	129,4	29,2	128,8	29,2	129,4	28,9

	Procedimento 1		Procedimento 2		Procedimento 3	
	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)
1_C_6B25	140,4	21,4	140,4	21,4	140,4	21,4
	146,3	18,0	146,4	18,0	146,3	17,9
	156,0	17,7	156,1	17,8	155,9	17,7
	154,0	16,8	154,2	16,9	154,0	16,9
	160,0	17,7	160,8	17,8	160,8	17,8
	151,5	18,9	152,3	18,9	152,2	18,9
	140,7	20,1	141,6	19,9	141,0	19,9
	138,2	20,4	139,5	20,3	138,2	20,4
	135,7	19,7	137,0	19,6	135,7	19,8
	128,1	23,4	129,9	23,2	128,2	23,4
1_C_6C05	651,7	6,8	651,7	6,9	651,7	6,8
	546,8	9,9	547,1	9,9	546,9	9,9
	527,4	12,2	528,2	12,2	526,7	12,1
	482,8	12,7	483,8	12,8	483,5	12,8
	453,2	16,6	455,0	16,6	452,9	16,6
	392,3	20,2	396,7	20,1	393,9	20,1
	325,3	23,2	330,0	23,0	325,3	23,1
	270,7	27,1	276,7	26,7	270,7	27,1
	208,4	30,6	215,6	29,7	208,5	30,5
	158,2	31,7	164,7	30,5	158,2	31,6
1_C_6C15	415,6	12,7	415,9	12,7	415,6	12,7
	341,6	15,1	341,8	15,2	341,5	15,1
	320,8	15,9	320,7	15,8	320,7	15,8
	292,1	15,9	292,2	15,9	292,1	15,9
	283,1	17,0	283,4	17,0	283,7	17,0
	253,5	22,0	256,3	21,8	255,0	21,8
	230,5	21,5	231,6	21,4	230,8	21,4
	205,6	21,5	209,0	21,3	205,6	21,5
	184,3	24,2	183,2	24,3	184,3	24,3
	158,3	24,0	167,3	22,7	158,3	23,9
1_C_6C25	84,2	32,5	84,2	32,6	84,2	32,5
	97,8	22,9	97,8	23,0	97,8	22,9
	106,2	21,3	106,3	21,4	106,2	21,3
	107,9	20,2	108,0	20,2	108,0	20,2
	111,5	21,8	111,7	21,8	111,8	21,8
	113,2	20,9	114,6	20,7	113,8	20,7
	103,9	23,4	104,2	23,3	104,1	23,3
	102,9	24,1	102,9	24,1	102,9	24,1
	103,4	23,9	103,9	23,8	103,4	23,9
	103,8	22,0	104,2	21,9	103,8	21,9
2_C_6A05	856,1	5,0	856,2	5,0	856,1	5,0
	718,7	8,0	719,0	8,0	718,7	8,0
	747,1	10,8	748,5	13,2	747,1	10,8
	682,9	12,0	683,7	12,0	682,8	12,0
	651,7	13,9	657,5	14,2	654,2	14,0
	554,3	17,7	557,8	17,6	556,7	17,6
	475,7	18,9	482,1	18,9	475,0	19,0
	392,9	20,3	397,9	20,4	392,6	20,5
	336,4	24,1	347,7	23,6	336,7	24,1
	266,3	23,2	262,8	23,5	266,1	23,5

	Procedimento1		Procedimento 2		Procedimento 3	
	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)
2_C_6A15	363,1	14,8	363,4	14,8	363,1	14,8
	287,8	17,8	288,0	17,8	287,7	17,8
	271,9	18,8	272,3	18,9	272,0	18,9
	245,7	18,5	246,2	18,6	245,9	18,6
	242,3	21,1	242,9	21,1	242,1	21,1
	212,0	21,5	213,7	21,5	212,7	21,4
	200,8	23,5	202,5	23,4	200,8	23,5
	182,2	25,4	184,4	25,2	182,2	25,4
	165,9	27,2	166,9	27,0	165,9	27,2
	159,9	25,3	162,7	25,0	159,9	25,4
2_C_6A25	82,7	29,3	82,7	29,4	82,7	29,3
	95,6	21,2	95,6	21,2	95,6	21,2
	107,3	19,5	107,3	19,5	107,3	19,5
	111,0	19,2	111,1	19,2	111,0	19,2
	116,0	19,8	116,5	19,8	116,6	19,8
	112,6	21,0	114,4	20,9	113,1	20,9
	108,1	22,3	108,4	22,2	108,2	22,2
	107,4	24,1	108,1	24,0	107,4	24,1
	106,2	26,2	106,7	26,1	106,2	26,2
	100,1	27,7	100,8	27,6	100,1	27,7
2_C_6B05	719,0	5,0	718,9	5,0	719,0	5,0
	650,3	10,0	650,5	10,0	650,2	9,9
	601,1	11,4	600,7	11,4	600,6	11,3
	602,9	13,4	603,9	13,5	603,5	13,5
	590,1	14,6	590,4	14,7	592,5	14,8
	510,6	15,8	514,5	15,9	512,2	15,7
	429,8	20,3	433,7	20,2	430,2	20,2
	389,1	24,0	388,9	24,0	389,2	24,0
	300,0	24,2	303,1	23,9	300,0	24,1
	232,8	24,7	250,0	23,6	233,3	24,1
2_C_6B15	354,3	15,5	354,6	15,6	354,3	15,5
	305,6	17,4	305,9	17,5	305,6	17,4
	284,1	17,9	284,6	18,0	283,9	17,8
	269,6	16,9	269,8	16,9	269,5	16,9
	264,6	21,1	265,4	21,1	265,0	21,1
	232,4	21,2	235,0	21,1	233,2	21,1
	213,8	26,0	215,6	25,9	213,2	26,1
	196,5	24,9	199,4	24,8	196,5	25,0
	182,1	27,1	184,2	26,8	182,1	27,1
	154,3	32,0	156,8	31,6	154,3	32,3
2_C_6B25	94,7	21,2	94,7	21,3	94,7	21,2
	110,9	17,9	111,0	17,9	110,9	17,9
	111,0	20,8	111,1	20,8	111,0	20,8
	116,3	19,4	116,4	19,4	116,3	19,4
	119,2	21,1	119,4	21,1	119,4	21,1
	107,6	23,3	108,2	23,1	108,1	23,1
	112,1	22,1	112,4	22,0	112,2	22,1
	113,0	20,6	113,4	20,5	113,0	20,5
	113,9	21,2	113,8	21,2	113,9	21,2
	110,2	19,9	110,0	19,8	110,2	19,8

	Procedimento 1		Procedimento 2		Procedimento 3	
	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)
2_C_6C05	797,1	3,9	797,0	3,9	797,0	3,9
	711,3	9,2	712,0	9,3	712,0	9,3
	777,5	10,9	779,9	12,9	778,7	10,6
	595,5	13,3	595,0	13,3	595,4	13,3
	577,5	15,2	581,1	15,4	579,8	15,4
	520,4	14,9	525,4	14,7	523,9	14,7
	431,3	18,9	436,7	18,9	431,6	18,9
	369,8	20,7	375,1	20,5	369,9	20,6
	305,6	23,4	301,2	23,8	305,2	23,8
	254,6	28,1	258,8	27,7	255,9	27,1
2_C_6C15	224,8	21,6	224,9	21,6	224,7	21,6
	198,5	18,2	198,5	18,3	198,5	18,2
	184,6	20,7	184,4	20,7	184,6	20,7
	179,2	20,3	179,3	20,3	179,3	20,3
	189,5	23,5	189,2	23,5	189,7	23,6
	184,1	25,1	184,5	25,1	184,2	25,1
	168,3	27,1	169,8	26,9	168,4	27,0
	154,0	28,7	154,2	28,6	154,0	28,7
	148,7	32,2	151,2	31,6	148,7	32,1
	140,5	32,1	140,9	32,0	140,5	32,1
2_C_6C25	113,7	24,3	113,8	24,4	113,7	24,3
	122,6	20,8	122,7	20,8	122,6	20,8
	131,2	19,7	131,3	19,8	131,2	19,8
	133,1	19,0	133,2	19,0	133,1	19,0
	136,9	20,0	137,5	20,0	137,5	20,0
	135,4	21,0	135,3	20,9	135,9	20,8
	126,5	21,1	126,9	20,9	126,6	21,0
	121,5	21,8	122,5	21,7	121,5	21,8
	122,0	21,0	122,3	20,9	122,0	20,9
	122,7	19,9	123,5	19,8	122,7	19,8
3_C_6A05	867,5	7,0	867,8	7,0	867,5	7,0
	752,2	8,5	752,6	8,5	752,4	8,5
	757,4	11,4	759,0	11,5	756,8	11,3
	651,2	13,4	655,1	13,5	651,0	13,4
	579,8	15,7	573,9	15,6	578,5	15,7
	529,6	19,2	528,1	19,2	530,6	19,2
	450,1	22,0	455,3	21,8	450,4	21,9
	379,8	27,4	387,9	26,8	380,0	27,3
	322,0	29,5	328,4	28,8	321,9	29,3
	254,4	33,9	261,8	33,0	254,4	34,0
3_C_6A15	355,8	13,5	356,1	13,5	355,8	13,5
	295,7	15,3	295,9	15,3	295,7	15,3
	281,3	15,4	281,7	15,5	281,3	15,4
	258,2	15,1	258,6	15,2	258,3	15,1
	260,7	17,5	260,9	17,6	260,4	17,5
	243,4	18,2	246,7	18,3	242,9	18,2
	223,5	23,5	222,8	23,6	223,2	23,6
	199,1	26,0	201,0	25,9	199,1	26,0
	184,8	27,0	188,8	26,4	184,8	26,8
	163,2	24,0	164,1	23,8	163,2	23,8

	Procedimento 1		Procedimento 2		Procedimento 3	
	E (Mpa)	ϕ (°)	E (Mpa)	ϕ (°)	E (Mpa)	ϕ (°)
3_C_6A25	103,1	32,0	103,2	32,0	103,1	32,0
	117,4	25,5	117,5	25,6	117,4	25,5
	126,6	23,9	126,7	23,9	126,6	23,9
	129,7	22,8	129,7	22,8	129,7	22,8
	134,3	24,3	134,6	24,3	134,8	24,3
	131,8	24,8	132,6	24,6	132,4	24,6
	127,2	25,2	127,8	25,1	127,3	25,2
	131,6	25,9	132,2	25,8	131,6	25,9
	126,8	24,7	127,8	24,5	126,8	24,6
	128,5	26,5	128,1	26,5	128,5	26,5
3_C_6B05	636,6	8,3	636,8	8,3	636,6	8,3
	533,7	8,4	534,0	8,4	533,8	8,4
	512,9	13,2	513,3	13,2	512,7	13,1
	468,3	14,2	468,9	14,2	468,0	14,2
	425,5	16,8	428,4	16,8	425,8	16,8
	379,8	20,1	382,9	19,9	381,0	20,0
	325,9	23,0	329,9	22,8	326,2	22,9
	276,7	25,3	282,7	24,7	276,8	25,1
	234,2	29,7	238,3	29,3	234,2	29,7
	187,2	31,4	191,8	30,7	187,1	31,4
3_C_6B15	433,7	12,9	434,0	12,9	433,7	12,9
	363,0	14,3	363,2	14,3	363,0	14,3
	353,1	15,5	353,0	15,5	353,1	15,5
	331,1	15,2	331,3	15,3	331,1	15,2
	327,3	16,7	330,0	16,8	329,8	16,8
	294,9	20,1	296,6	20,0	296,2	20,0
	281,0	18,7	282,8	18,8	281,3	18,7
	262,6	18,9	261,9	19,0	262,5	19,0
	252,4	22,2	254,8	22,0	252,4	22,2
	229,9	24,3	236,0	23,8	229,9	24,3
3_C_6B25	90,6	23,7	90,7	23,8	90,6	23,7
	110,0	15,5	110,0	15,5	110,0	15,5
	116,7	17,4	116,7	17,5	116,7	17,4
	121,6	17,2	121,6	17,2	121,5	17,2
	123,4	18,3	123,8	18,3	123,8	18,3
	123,6	19,1	123,6	19,0	124,0	19,0
	119,3	19,1	119,4	19,0	119,3	19,0
	119,4	20,3	119,9	20,3	119,4	20,3
	118,9	19,2	119,5	19,1	118,9	19,2
	120,5	19,3	121,0	19,3	120,5	19,3
3_C_6C05	1326,7	7,3	1326,9	7,4	1326,7	7,3
	1144,6	10,0	1145,0	10,0	1144,7	10,0
	1060,8	13,1	1060,8	13,1	1061,9	13,2
	942,7	15,7	944,6	15,8	942,8	15,7
	836,1	18,5	836,4	18,6	839,8	18,6
	703,1	22,3	703,1	22,4	708,3	22,2
	601,4	26,1	607,3	25,9	601,4	26,1
	497,8	29,3	504,9	29,1	497,7	29,4
	380,2	33,8	395,3	32,7	380,2	33,7
	292,8	40,4	303,5	39,3	292,6	40,7

	Procedimento 1		Procedimento 2		Procedimento 3	
	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)
3_C_6C15	242,2	20,0	242,4	20,0	242,2	20,0
	206,3	19,2	206,4	19,2	206,3	19,2
	209,0	21,7	209,2	21,8	208,9	21,7
	200,5	19,4	200,5	19,4	200,4	19,3
	195,1	22,9	195,9	22,9	196,0	22,9
	175,4	27,0	178,0	26,8	176,0	26,9
	166,0	25,4	167,6	25,2	166,2	25,3
	155,5	28,0	155,3	28,0	155,5	27,9
	147,3	29,0	149,2	28,7	147,3	29,0
	139,4	28,4	139,9	28,2	139,4	28,3
3_C_6C25	65,4	27,8	65,5	27,9	65,4	27,8
	99,9	18,8	100,0	18,9	99,9	18,8
	113,7	19,4	113,7	19,6	113,7	19,5
	112,2	17,5	112,3	17,5	112,2	17,4
	129,7	12,7	129,9	12,7	130,3	12,8
	128,8	16,4	129,5	16,5	129,2	16,4
	113,8	20,6	114,9	20,6	114,1	20,5
	113,6	21,6	114,3	21,5	113,7	21,5
	111,5	25,2	112,4	25,0	111,5	25,2
	115,4	26,4	116,5	26,3	115,4	26,5
4_C_6A05	590,7	7,5	590,9	7,6	590,7	7,5
	525,9	9,4	526,1	9,4	525,8	9,4
	484,9	10,2	485,1	10,2	484,9	10,2
	466,7	12,4	466,0	12,3	467,3	12,4
	449,1	14,2	445,9	14,1	449,7	14,3
	432,0	15,4	433,3	15,4	434,3	15,3
	374,2	17,9	377,4	17,8	374,5	17,8
	337,3	16,5	338,7	16,5	337,3	16,5
	283,3	19,5	292,1	18,9	283,3	19,3
	262,6	17,7	271,3	17,5	262,7	17,5
4_C_6A15	360,7	14,2	360,9	14,3	360,7	14,2
	305,9	15,2	306,1	15,2	305,9	15,2
	296,4	17,1	296,9	17,2	296,5	17,1
	282,9	16,2	283,2	16,2	282,8	16,2
	277,2	18,7	276,1	18,7	276,1	18,7
	251,1	19,8	253,0	19,7	251,3	19,7
	229,9	21,2	231,2	21,2	229,8	21,3
	219,8	21,5	220,4	21,4	219,8	21,5
	204,8	20,6	206,6	20,4	204,8	20,6
	182,7	20,4	184,9	20,1	182,7	20,4
4_C_6A25	7,9	-37,6	34,6	33,0	10,9	-36,4
	52,4	25,8	52,3	25,5	52,4	25,9
	85,9	23,0	85,9	23,0	85,9	22,9
	95,5	17,3	95,3	17,2	95,4	17,2
	111,6	16,4	111,6	16,5	112,0	16,5
	98,3	14,1	98,8	14,0	98,9	14,0
	110,0	18,0	110,5	17,8	110,3	17,8
	111,8	18,7	111,9	18,6	111,9	18,6
	112,9	21,6	112,5	21,6	112,9	21,5
	110,1	21,9	110,7	21,8	110,1	21,8

	Procedimento 1		Procedimento 2		Procedimento 3	
	E (Mpa)	ϕ (°)	E (Mpa)	ϕ (°)	E (Mpa)	ϕ (°)
4_C_6B05	725,9	6,9	726,0	6,9	725,9	6,9
	629,8	9,6	630,1	9,6	629,7	9,6
	595,4	12,4	595,4	12,5	595,3	12,4
	547,3	12,9	548,4	13,0	547,8	12,9
	518,1	16,0	521,0	16,1	518,9	16,1
	447,1	19,4	453,9	19,4	448,2	19,4
	380,2	20,9	384,3	20,9	380,1	20,9
	328,4	19,3	331,8	19,4	328,3	19,5
	269,0	23,2	275,7	22,6	269,1	22,9
	263,6	20,5	273,3	20,1	263,2	20,9
4_C_6B15	359,2	12,4	359,4	12,4	359,2	12,4
	315,9	13,8	316,0	13,8	315,9	13,8
	298,5	14,3	298,9	14,3	298,6	14,3
	273,8	15,2	273,7	15,2	273,5	15,2
	262,7	17,8	262,7	17,8	263,3	17,8
	237,9	18,0	241,4	18,0	238,2	18,0
	213,7	20,1	215,0	20,0	213,7	20,1
	193,7	20,7	196,7	20,6	193,7	20,8
	179,4	24,3	178,5	24,4	179,4	24,4
	165,5	20,3	168,1	20,1	165,5	20,3
4_C_6B25	76,8	16,6	76,8	16,6	76,7	16,6
	89,7	11,9	89,7	12,0	89,7	12,0
	123,8	11,6	123,7	11,6	123,9	11,7
	140,2	9,9	140,2	9,9	140,3	9,9
	155,0	10,7	156,2	10,9	155,7	10,8
	155,1	11,4	156,6	11,2	156,8	11,2
	149,8	12,7	150,2	12,6	150,2	12,6
	144,9	14,6	144,0	14,3	145,1	14,3
	149,3	13,0	147,6	12,9	149,4	12,7
	143,7	14,1	145,5	14,0	143,8	13,8
4_C_6C05	568,9	7,7	569,1	7,7	568,9	7,7
	482,0	9,2	482,2	9,3	482,0	9,2
	468,6	10,8	468,3	10,8	468,9	10,8
	446,5	12,5	446,4	12,5	446,4	12,5
	439,7	13,8	438,9	13,7	440,5	13,8
	404,0	14,5	408,3	14,4	405,8	14,3
	365,7	18,1	370,1	17,9	366,7	17,9
	329,4	15,9	330,9	15,9	329,4	16,0
	257,4	22,4	262,0	22,2	257,3	22,6
	226,3	23,5	232,3	23,0	226,4	23,5
4_C_6C15	260,2	17,4	260,4	17,4	260,1	17,4
	229,1	18,2	229,3	18,2	229,1	18,2
	218,1	18,4	218,6	18,5	218,2	18,4
	207,8	16,9	208,3	16,9	207,8	16,9
	199,3	20,7	199,5	20,7	199,8	20,7
	200,5	27,9	200,6	27,9	200,5	27,9
	171,0	24,0	172,4	23,8	171,2	23,9
	165,7	24,3	166,5	24,3	165,7	24,4
	154,6	24,2	156,4	24,0	154,6	24,1
	148,1	22,2	149,3	22,0	148,1	22,2

	Procedimento 1		Procedimento 2		Procedimento 3	
	E (Mpa)	ϕ (°)	E (Mpa)	ϕ (°)	E (Mpa)	ϕ (°)
4_C_6C25	79,0	17,9	79,0	18,0	79,0	17,9
	111,5	20,1	111,5	20,1	111,5	20,1
	122,2	18,8	122,2	18,8	122,2	18,8
	127,7	16,5	127,7	16,5	127,7	16,5
	134,0	18,5	134,2	18,6	134,5	18,6
	132,7	15,3	133,3	15,3	133,3	15,2
	130,1	19,8	129,3	19,7	130,4	19,6
	128,5	22,9	128,9	22,9	128,5	22,9
	128,8	30,1	130,3	29,7	128,7	30,1
	119,1	24,6	120,2	24,3	119,2	24,4
5_C_6A05	583,6	8,1	583,9	8,2	583,6	8,1
	496,1	10,3	496,4	10,4	496,1	10,3
	467,3	12,6	468,7	12,8	467,4	12,6
	401,7	13,8	402,0	13,8	401,3	13,8
	374,7	16,0	375,6	16,0	378,4	16,1
	339,0	18,0	338,8	18,1	339,4	18,0
	297,2	21,0	300,1	20,8	297,0	21,0
	261,5	22,2	262,1	22,3	261,5	22,3
	211,6	25,4	214,8	25,0	211,5	25,3
	176,8	29,1	180,9	28,5	176,8	29,1
5_C_6A15	402,2	11,8	402,4	11,9	402,2	11,8
	358,0	14,1	358,1	14,1	358,1	14,1
	359,3	15,3	359,3	15,3	359,4	15,4
	315,1	16,1	315,7	16,2	315,6	16,2
	315,7	14,4	319,1	14,6	317,0	14,4
	289,1	17,5	295,4	17,7	290,1	17,4
	246,5	20,5	249,2	20,6	246,7	20,5
	218,8	25,1	219,1	25,0	218,9	25,0
	188,5	30,1	190,6	29,6	188,5	29,9
	178,4	31,8	178,7	31,7	178,4	31,7
5_C_6A25	70,0	34,0	70,0	34,0	70,0	34,0
	90,9	22,8	90,9	22,8	90,9	22,8
	110,1	19,9	110,1	19,9	110,1	19,8
	114,9	16,7	114,8	16,7	114,9	16,7
	123,9	18,5	124,2	18,5	124,5	18,5
	125,7	19,4	127,3	19,3	126,4	19,3
	122,3	21,2	122,6	21,1	122,5	21,1
	122,1	22,0	123,1	21,9	122,1	22,0
	127,1	23,7	123,4	22,5	127,1	23,7
	127,6	21,7	125,7	22,0	127,6	21,7
5_C_6B05	725,0	7,2	725,1	7,2	725,0	7,2
	596,4	9,2	596,7	9,3	596,4	9,3
	577,2	12,3	577,7	12,4	577,1	12,3
	512,6	13,3	513,7	13,4	512,7	13,3
	461,3	15,5	460,4	15,5	459,9	15,5
	376,7	19,0	381,2	19,0	379,7	18,9
	324,9	22,0	327,8	22,0	325,0	22,0
	280,2	23,8	283,0	23,6	280,1	23,8
	224,1	26,0	229,7	25,4	224,1	25,9
	183,0	32,0	186,7	31,4	183,0	32,0

	Procedimento 1		Procedimento 2		Procedimento 3	
	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)
5_C_6B15	345,7	14,1	345,9	14,1	345,7	14,1
	301,6	15,8	301,8	15,9	301,6	15,8
	291,8	16,3	291,8	16,3	291,8	16,3
	278,5	16,3	278,7	16,4	278,4	16,3
	299,9	15,8	300,6	15,8	301,6	15,9
	278,6	20,9	280,6	20,7	280,6	20,7
	236,4	22,4	238,3	22,1	237,4	22,1
	220,4	22,4	223,5	22,6	220,0	22,8
	195,7	33,6	197,9	33,3	195,7	33,6
	166,3	30,8	165,7	30,8	166,2	30,8
5_C_6B25	132,7	24,4	132,8	24,4	132,7	24,4
	138,7	19,9	138,8	20,0	138,7	19,9
	155,2	19,4	155,2	19,3	155,2	19,4
	158,9	16,9	158,9	16,9	158,9	16,9
	162,5	18,2	162,8	18,2	163,1	18,2
	156,2	16,8	156,8	16,7	156,8	16,6
	155,8	18,8	156,5	18,7	156,1	18,7
	154,3	21,3	153,8	21,4	154,3	21,4
	146,6	23,2	147,1	23,1	146,6	23,2
	147,2	20,8	147,3	20,7	147,2	20,8
5_C_6C05	365,2	6,3	365,4	6,4	365,2	6,3
	353,7	8,5	353,8	8,5	353,7	8,5
	345,5	10,4	345,8	10,4	345,6	10,4
	325,1	11,0	325,4	11,0	324,9	11,0
	307,0	13,7	309,2	13,7	307,5	13,7
	274,2	14,0	278,0	14,0	274,4	13,9
	249,9	18,7	253,5	18,6	249,9	18,7
	220,1	21,0	224,8	20,7	220,1	21,0
	190,5	24,9	195,0	24,4	190,5	24,8
	167,4	27,8	172,7	27,0	167,4	27,8
5_C_6C15	289,0	11,3	289,2	11,3	289,0	11,3
	258,7	13,0	258,9	13,1	258,7	13,0
	250,1	14,4	250,3	14,4	250,0	14,3
	236,9	13,5	237,0	13,5	236,9	13,5
	230,9	16,7	232,2	16,7	231,9	16,7
	219,6	17,1	221,5	17,1	219,8	17,1
	194,7	19,1	196,9	18,9	195,1	19,0
	184,5	20,3	185,6	20,2	184,5	20,3
	165,8	24,8	168,4	24,5	165,7	24,8
	149,8	24,5	152,5	24,1	149,8	24,5
5_C_6C25	95,4	37,5	95,4	37,5	95,3	37,5
	109,9	26,8	110,0	26,8	109,9	26,8
	124,9	24,7	124,9	24,7	124,9	24,7
	133,1	21,1	133,2	21,1	133,2	21,1
	138,7	24,8	139,3	24,8	139,3	24,8
	136,2	30,7	137,3	30,5	136,9	30,5
	138,1	28,2	138,7	28,0	138,3	28,1
	139,2	28,3	140,9	28,0	139,3	28,3
	140,9	30,6	139,4	30,9	140,9	30,6
	134,7	33,7	136,0	33,4	134,7	33,7

	Procedimento 1		Procedimento 2		Procedimento 3	
	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)
6_C_6A05	1364,7	7,2	1364,9	7,2	1364,6	7,2
	1173,8	8,6	1174,1	8,6	1173,9	8,6
	1152,1	12,2	1154,0	12,3	1152,4	12,2
	959,2	14,0	960,9	14,0	957,7	13,9
	869,2	16,6	869,8	16,6	869,9	16,6
	779,4	20,8	786,8	20,6	784,4	20,6
	637,5	22,4	640,9	22,2	638,3	22,3
	531,9	25,5	538,7	25,1	532,0	25,4
	427,3	27,8	440,6	27,1	427,2	27,7
	332,3	29,0	343,6	28,1	332,2	29,0
6_C_6A15	278,6	16,6	278,8	16,7	278,6	16,6
	233,2	17,0	233,3	17,0	233,2	17,0
	228,1	17,0	228,1	17,0	228,0	17,0
	224,5	15,6	224,8	15,7	224,4	15,6
	214,8	18,8	215,4	18,8	215,2	18,8
	199,6	21,3	201,1	21,2	200,1	21,2
	193,4	20,7	194,0	20,7	193,3	20,8
	185,9	21,5	186,4	21,4	186,0	21,4
	177,1	22,4	178,2	22,3	177,0	22,4
	166,3	23,8	167,7	23,7	166,3	23,8
6_C_6A25	90,8	26,4	90,8	26,4	90,7	26,3
	111,6	22,5	111,6	22,5	111,6	22,5
	136,2	22,0	136,3	22,1	136,2	21,9
	139,6	18,5	139,7	18,6	139,7	18,5
	161,1	18,4	161,5	18,5	161,7	18,5
	152,6	18,4	153,3	18,3	153,7	18,3
	147,4	20,2	147,9	20,0	147,9	20,0
	145,7	23,0	146,6	22,8	145,8	22,8
	148,5	22,2	148,2	22,3	148,5	22,3
	151,1	23,5	152,0	23,3	151,2	23,3
6_C_6B05	975,1	8,3	975,1	8,3	975,1	8,3
	834,7	9,4	834,9	9,4	834,7	9,4
	795,5	13,2	796,3	13,3	795,4	13,2
	701,8	14,4	702,5	14,4	701,1	14,4
	650,1	17,8	654,9	17,8	651,7	17,8
	537,9	20,6	544,1	20,4	540,9	20,4
	456,5	24,7	462,0	24,5	456,4	24,7
	376,3	28,3	381,3	28,0	376,3	28,3
	290,7	32,1	299,3	31,3	290,6	32,2
	233,0	36,7	242,8	35,4	232,9	36,9
6_C_6B15	248,3	14,9	248,4	14,9	248,3	14,9
	228,3	14,6	228,4	14,6	228,3	14,6
	223,9	14,7	224,3	14,8	223,9	14,7
	213,2	13,4	213,3	13,4	213,4	13,4
	211,7	16,0	212,7	16,0	211,7	15,9
	210,4	16,7	211,9	16,6	211,0	16,6
	190,9	16,3	191,8	16,3	190,9	16,3
	181,3	17,0	181,1	17,1	181,3	17,1
	169,0	17,8	170,4	17,7	169,0	17,8
	163,7	15,4	163,5	15,3	163,6	15,3

	Procedimento 1		Procedimento 2		Procedimento 3	
	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)
6_C_6B25	91,8	26,6	91,8	26,6	91,8	26,6
	104,5	20,6	104,5	20,6	104,5	20,6
	126,7	15,1	126,9	15,2	126,6	15,1
	132,4	17,4	132,4	17,4	132,8	17,5
	162,7	19,1	162,9	19,2	162,6	19,2
	135,1	19,9	135,6	19,7	136,1	19,7
	129,2	21,8	129,7	21,7	128,9	21,9
	130,6	20,0	131,3	19,9	130,7	20,0
	146,4	22,4	147,5	22,4	146,3	22,8
	124,3	21,8	124,1	21,8	124,3	21,6
6_C_6C05	747,3	10,2	747,6	10,2	747,3	10,2
	637,2	10,1	637,5	10,1	637,2	10,1
	586,9	14,3	586,5	14,2	586,9	14,3
	544,5	15,2	545,1	15,2	544,4	15,1
	515,0	17,3	519,3	17,3	518,2	17,2
	454,2	20,4	456,8	20,3	455,6	20,3
	388,0	23,9	391,8	23,7	388,2	23,8
	329,7	26,5	334,7	26,2	329,7	26,5
	259,3	30,4	264,0	29,9	259,3	30,3
	213,8	34,5	220,1	33,6	213,9	34,4
6_C_6C15	297,6	15,9	297,8	15,9	297,5	15,9
	235,4	15,2	235,6	15,3	235,4	15,2
	228,0	18,1	227,9	18,1	227,8	18,0
	215,3	16,9	215,6	16,9	215,4	16,9
	207,7	19,4	208,8	19,4	207,4	19,3
	187,6	19,9	189,9	19,9	188,0	19,9
	174,8	21,5	175,7	21,5	174,7	21,5
	163,0	22,0	163,7	22,0	162,9	22,0
	155,7	22,6	156,2	22,5	155,6	22,6
	145,6	21,6	144,8	21,7	145,6	21,6
6_C_6C25	84,7	29,3	84,8	29,3	84,7	29,3
	101,2	21,9	101,2	21,9	101,2	21,9
	123,6	22,0	123,7	22,0	123,6	22,0
	124,1	19,0	124,0	19,0	124,1	19,0
	132,2	21,0	132,3	21,0	132,6	21,0
	128,5	21,2	129,0	21,1	129,1	21,1
	124,1	21,9	124,4	21,8	124,3	21,8
	122,2	23,2	122,7	23,1	122,2	23,2
	121,9	24,4	121,2	24,7	121,9	24,6
	123,3	24,3	123,8	24,2	123,3	24,3
7_C_6A05	978,9	5,7	979,1	5,7	978,9	5,7
	844,5	8,9	844,8	8,9	844,4	8,8
	794,1	10,0	794,1	10,0	794,1	10,0
	750,5	11,3	751,3	11,3	750,5	11,3
	715,6	12,8	722,3	13,0	718,4	12,9
	695,9	14,3	697,8	14,3	697,0	14,2
	540,9	17,2	548,0	17,2	541,1	17,2
	535,2	19,7	529,8	19,7	535,3	19,7
	437,4	22,3	461,4	21,5	437,3	22,3
	387,8	23,8	382,5	23,9	387,9	23,6

	Procedimento 1		Procedimento 2		Procedimento 3	
	E (Mpa)	ϕ (°)	E (Mpa)	ϕ (°)	E (Mpa)	ϕ (°)
7_C_6A15	505,7	11,0	506,0	11,0	505,7	11,0
	431,7	13,0	431,9	13,0	431,6	13,0
	414,1	14,0	414,3	14,0	414,3	14,0
	380,5	13,6	380,6	13,6	380,4	13,6
	355,7	15,9	358,3	16,0	356,4	15,9
	318,5	16,2	320,9	16,1	319,9	16,1
	283,5	19,6	286,5	19,4	283,7	19,5
	254,4	20,0	256,6	19,9	254,4	20,0
	224,0	21,1	227,6	20,8	224,0	21,1
	198,7	20,8	201,2	20,6	198,7	20,8
7_C_6A25	264,3	12,7	264,4	12,7	264,3	12,7
	233,9	14,6	234,0	14,6	233,9	14,6
	279,8	17,4	279,8	17,6	279,7	17,5
	258,9	17,1	259,2	17,1	259,0	17,1
	263,0	17,3	263,4	17,3	263,9	17,4
	239,3	20,2	241,4	20,2	240,8	20,1
	215,5	22,1	216,2	22,1	216,1	22,0
	197,6	23,9	199,4	23,7	197,7	23,8
	181,3	24,5	182,9	24,2	181,3	24,3
	168,3	27,9	170,2	27,6	168,2	28,0
7_C_6B05	1037,8	5,1	1038,0	5,1	1037,8	5,1
	907,1	5,7	907,1	5,7	907,3	5,7
	908,2	9,0	909,2	9,1	908,0	9,0
	860,1	10,5	861,7	10,6	859,8	10,5
	797,8	12,6	799,1	12,7	800,2	12,7
	769,0	14,5	771,1	14,5	769,8	14,5
	701,7	14,7	705,9	14,6	702,1	14,6
	624,8	17,3	627,1	17,3	624,6	17,3
	515,9	19,6	528,2	19,3	515,9	19,7
	450,6	22,2	463,3	21,7	450,5	22,3
7_C_6B15	491,0	189,6	490,9	9,6	491,0	9,6
	415,6	11,0	415,8	11,0	415,6	11,0
	431,7	13,4	431,6	13,3	431,7	13,4
	370,3	14,0	370,7	14,1	370,3	14,0
	356,9	15,9	358,3	16,0	357,6	16,0
	329,4	15,7	332,5	15,8	331,8	15,6
	266,6	19,4	267,5	19,7	267,2	19,4
	219,8	21,6	221,2	21,9	219,4	21,9
	179,9	25,7	184,1	25,2	179,9	25,7
	165,6	29,4	168,5	28,9	165,6	29,3
7_C_6B25	215,0	13,6	215,0	13,6	215,0	13,6
	192,1	15,6	192,1	15,7	192,0	15,6
	180,9	18,9	179,2	17,8	181,0	19,2
	185,1	17,3	184,5	17,1	184,8	17,2
	213,9	18,4	214,2	18,4	214,9	18,5
	206,4	22,4	209,5	22,2	209,3	22,1
	178,8	24,0	178,8	24,0	179,3	23,9
	172,2	24,7	173,5	24,5	172,3	24,6
	160,6	26,4	161,8	26,2	160,7	26,3
	152,5	28,7	153,8	28,4	152,6	28,4

	Procedimento 1		Procedimento 2		Procedimento 3	
	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)
7_C_6C05	1160,3	3,8	1160,5	3,8	1160,3	3,8
	1022,6	6,8	1023,2	6,8	1022,6	6,8
	935,8	9,2	937,2	9,3	936,1	9,2
	855,7	10,8	856,0	10,8	855,3	10,8
	803,4	13,0	809,5	13,1	806,8	13,1
	724,6	15,3	733,5	15,3	726,5	15,2
	647,4	15,8	668,0	15,3	647,8	15,6
	515,3	16,2	523,3	16,3	515,1	16,3
	432,8	19,7	435,6	19,6	432,7	19,7
	351,8	22,4	361,8	21,9	351,9	22,3
7_C_6C15	204,4	12,0	204,5	12,0	204,4	12,0
	191,0	14,6	191,1	14,6	191,0	14,6
	178,5	13,6	178,0	13,4	178,7	13,7
	181,9	13,9	181,8	13,9	181,9	13,9
	183,3	15,5	183,7	15,6	184,2	15,7
	181,2	15,6	181,7	15,6	182,0	15,6
	154,0	16,4	155,3	16,4	154,5	16,2
	137,1	15,8	139,2	15,5	137,2	15,5
	136,4	20,2	137,8	20,0	136,4	20,1
	117,2	20,7	112,0	21,7	117,0	21,6
7_C_6C25	97,6	17,0	97,6	17,0	97,6	17,0
	127,7	16,7	127,7	16,7	127,7	16,7
	200,2	15,9	200,3	15,9	200,2	15,9
	217,3	14,0	217,2	14,0	217,3	14,0
	238,1	13,6	238,5	13,6	239,0	13,7
	230,9	12,9	231,3	12,9	231,9	12,9
	217,5	16,3	217,4	16,2	217,8	16,2
	210,0	19,7	210,1	19,5	210,2	19,5
	203,0	21,6	202,7	21,7	202,9	21,7
	197,9	22,7	199,1	22,5	197,9	22,5
8_C_6A05	919,6	6,5	919,9	6,5	919,6	6,5
	814,4	9,1	814,8	9,1	814,4	9,1
	765,3	12,0	765,1	12,0	764,9	12,0
	690,7	13,0	692,4	13,1	690,7	13,0
	617,6	15,1	617,6	15,1	618,3	15,1
	546,5	16,9	548,8	16,9	547,0	16,9
	488,8	20,8	494,1	20,7	489,1	20,8
	414,9	23,6	420,5	23,5	414,7	23,8
	333,3	25,8	343,9	25,1	333,3	25,7
	261,9	27,9	271,8	27,0	262,0	27,9
8_C_6A15	383,5	9,0	383,7	9,0	383,4	9,0
	415,5	12,0	415,8	12,1	415,5	12,0
	345,5	14,1	345,3	13,8	345,5	14,1
	315,0	14,8	314,3	14,6	315,1	14,8
	333,4	15,4	335,4	15,4	335,9	15,5
	284,2	21,9	288,9	22,1	282,8	22,0
	294,8	20,1	289,6	20,2	294,8	20,1
	252,9	24,3	269,4	23,5	253,4	23,9
	199,4	19,3	199,3	19,2	199,4	19,1
	160,8	51,2	160,0	51,5	160,8	51,1

	Procedimento 1		Procedimento 2		Procedimento 3	
	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)
8_C_6A25	78,7	17,4	78,7	17,4	78,7	17,4
	130,4	21,6	172,6	22,1	173,9	21,3
	179,2	18,9	179,8	19,3	179,2	18,9
	167,5	15,4	168,3	15,6	166,5	15,2
	175,3	17,9	176,1	18,1	176,0	18,1
	164,4	20,2	165,7	20,1	165,4	20,1
	148,7	20,9	149,8	20,6	149,2	20,6
	146,0	22,5	145,7	22,6	146,0	22,6
	140,4	23,3	141,4	23,2	140,3	23,5
	135,8	27,1	138,1	26,8	135,7	27,4
8_C_6B05	577,0	7,1	577,3	7,1	577,0	7,1
	496,7	9,0	497,0	9,0	496,7	9,0
	463,0	11,8	463,2	11,9	463,1	11,9
	426,5	13,0	427,3	13,1	426,4	13,0
	390,8	15,6	392,3	15,6	392,4	15,6
	343,5	16,6	345,6	16,6	344,1	16,6
	308,4	20,9	311,2	20,8	308,3	20,9
	262,8	23,4	267,4	23,3	262,7	23,6
	211,9	26,4	216,9	25,9	211,9	26,4
	173,2	29,6	177,1	28,9	173,1	29,5
8_C_6B15	151,0	16,9	151,1	16,9	151,0	16,9
	158,5	15,7	158,6	15,7	158,5	15,7
	171,7	15,6	171,5	15,5	171,6	15,6
	171,2	14,5	170,2	14,2	170,8	14,4
	191,4	13,5	192,7	13,6	193,3	13,7
	179,1	14,0	179,2	13,9	179,9	13,9
	164,8	17,0	165,3	17,0	165,4	16,8
	157,0	18,6	159,5	18,5	157,0	18,6
	133,8	25,1	139,0	24,1	133,7	25,0
	134,9	31,1	139,3	30,4	135,0	31,0
8_C_6B25	165,0	17,0	165,0	17,0	165,0	17,0
	144,6	16,6	144,6	16,6	144,6	16,7
	157,4	16,7	157,4	16,7	157,1	16,6
	173,0	15,0	172,9	14,9	173,0	14,9
	181,6	16,2	181,6	16,2	181,9	16,3
	173,4	19,0	174,3	18,9	174,5	18,9
	164,9	18,4	165,3	18,3	165,2	18,3
	159,5	19,6	159,5	19,5	159,6	19,5
	147,8	19,7	146,6	19,7	147,9	19,5
	146,5	21,7	147,0	21,8	146,5	22,2
8_C_6C05	371,3	11,0	371,4	11,0	371,3	11,0
	353,6	11,1	353,7	11,1	353,6	11,1
	341,7	12,8	341,5	12,8	341,7	12,8
	327,4	13,2	327,1	13,2	327,4	13,2
	315,6	15,5	316,2	15,5	316,6	15,5
	271,1	20,9	272,2	20,9	271,9	20,8
	270,2	20,0	270,8	20,1	269,8	20,1
	251,1	22,0	253,2	21,9	251,1	22,0
	215,0	26,2	218,3	25,8	214,9	26,2
	185,5	27,6	189,9	27,0	185,5	27,5

	Procedimento 1		Procedimento 2		Procedimento 3	
	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)
8_C_6C15	227,6	12,3	227,7	12,3	227,6	12,3
	218,0	13,6	218,1	13,6	218,0	13,6
	219,1	13,6	219,1	13,6	219,2	13,7
	213,1	12,7	213,3	12,7	213,1	12,7
	232,3	14,0	235,6	14,3	235,5	14,2
	219,1	16,0	218,6	16,0	219,6	16,0
	199,3	17,3	202,6	17,2	198,9	17,4
	188,1	17,5	191,2	17,3	188,1	17,4
	159,4	20,6	158,7	20,7	159,4	20,6
	143,1	24,0	141,0	24,3	143,1	24,0
8_C_6C25	182,4	18,0	182,4	12,4	182,3	12,3
	149,5	18,3	149,5	18,4	149,5	18,3
	157,8	18,9	157,7	18,9	158,0	19,0
	176,0	16,2	176,0	16,2	175,9	16,2
	185,4	16,0	186,1	16,1	186,1	16,1
	174,1	17,9	175,9	17,8	175,0	17,8
	166,7	18,9	167,4	18,8	167,0	18,8
	155,5	19,6	156,0	19,6	155,5	19,6
	149,0	21,3	149,3	21,1	149,0	21,1
	147,9	20,1	148,4	20,1	148,0	20,1

Anexo B – Resultados Obtidos para as Misturas Betuminosas

Quadro B.1 – Resultados módulo de rigidez e ângulo de fase das misturas betuminosas

	Procedimento1		Procedimento 2		Procedimento 3	
	E (Mpa)	ϕ (°)	E (Mpa)	ϕ (°)	E (Mpa)	ϕ (°)
1C6D_15	878,3	6,4	878,2	6,4	878,3	6,4
	778,3	9,0	778,5	9,1	778,3	9,0
	739,4	11,4	739,8	11,4	739,4	11,4
	691,3	13,0	692,8	13,1	692,1	13,1
	646,3	14,8	648,9	14,7	648,2	14,7
	579,2	17,7	582,4	17,5	580,4	17,6
	506,7	19,6	510,6	19,5	506,7	19,6
	450,3	20,8	452,4	20,7	450,3	20,8
	386,9	23,1	392,6	22,8	387,0	23,0
1C6D_25	1245,8	8,8	1245,2	8,8	1245,7	8,8
	1120,2	12,3	1120,1	12,3	1120,2	12,3
	936,5	14,1	936,2	14,0	936,0	14,0
	840,7	16,0	840,2	16,0	841,7	16,0
	862,9	17,6	894,4	18,4	837,9	17,2
	775,5	22,0	789,6	22,1	779,1	21,9
	615,5	22,8	625,3	22,6	616,7	22,6
	516,8	23,7	523,2	23,4	517,1	23,6
	420,4	25,6	429,4	25,2	420,4	25,6
1C6E_05	2222,3	0,7	2221,6	0,7	2222,1	0,7
	2185,9	4,2	2185,9	4,2	2185,8	4,2
	2327,1	6,8	2327,1	6,7	2326,7	6,9
	2175,3	7,4	2179,6	7,6	2176,2	7,5
	2137,8	9,4	2144,8	9,5	2146,8	9,5
	1988,3	10,7	1996,6	10,7	1998,0	10,6
	1754,3	12,2	1779,8	12,1	1760,0	12,0
	1568,1	13,6	1565,6	13,6	1568,0	13,6
	1477,8	16,8	1508,0	16,5	1477,7	16,6
1C6E_15	1064,4	5,5	1064,2	5,5	1064,5	5,5
	987,8	8,7	987,8	8,7	987,8	8,7
	996,6	10,6	997,0	10,7	996,5	10,6
	872,2	11,8	873,4	11,9	872,5	11,8
	829,5	13,9	831,9	14,0	832,4	14,0
	711,8	16,7	717,4	16,7	715,2	16,6
	611,0	18,5	612,8	18,5	611,7	18,4
	539,3	20,2	542,1	20,2	539,2	20,3
	454,4	22,4	455,3	22,4	454,2	22,5
1C6E_25	1175,4	8,6	1175,1	8,6	1175,4	8,6
	1050,1	12,0	1050,0	12,0	1050,2	12,0
	942,1	14,2	942,8	14,2	942,4	14,2
	862,1	16,0	862,7	16,0	861,6	15,9
	837,6	18,0	839,2	18,1	841,1	18,2
	703,1	20,7	708,6	20,7	706,9	20,6
	579,4	22,4	586,4	22,3	580,5	22,3
	485,7	23,8	492,6	23,7	485,6	23,9
	405,8	24,4	413,2	24,1	405,7	24,5

	Procedimento1		Procedimento 2		Procedimento 3	
	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)
1C8E_05	1891,1	0,9	1890,6	0,9	1891,2	0,9
	1853,7	4,3	1853,3	4,4	1853,6	4,3
	1915,1	6,8	1915,2	6,8	1915,2	6,8
	1823,2	7,7	1824,9	7,8	1824,2	7,7
	1732,1	9,3	1746,9	9,6	1739,7	9,4
	1519,0	11,8	1530,9	11,7	1526,5	11,7
	1388,2	11,4	1408,2	11,3	1389,5	11,3
	1238,8	13,5	1267,5	13,5	1238,6	13,6
	960,0	15,3	972,8	15,2	960,0	15,3
1C8E_15	1514,3	5,0	1514,2	5,0	1514,3	5,0
	1375,4	8,3	1375,4	8,4	1375,4	8,3
	1296,0	11,0	1296,0	11,0	1295,5	11,0
	1180,9	12,8	1182,1	12,8	1181,0	12,8
	1117,4	15,3	1121,6	15,3	1121,4	15,3
	948,2	18,5	955,2	18,4	952,4	18,4
	810,0	21,0	814,6	21,0	810,1	21,0
	658,5	22,9	656,0	22,9	658,4	22,9
	528,2	26,6	540,9	25,9	528,1	26,5
1C8E_25	1282,6	9,4	1282,4	9,4	1282,6	9,4
	1123,7	12,9	1123,7	12,9	1123,7	12,9
	1019,5	15,5	1019,9	15,5	1019,5	15,5
	917,3	17,2	918,4	17,3	916,3	17,2
	863,1	19,3	864,4	19,3	865,7	19,4
	713,9	21,8	720,1	21,9	718,0	21,8
	590,8	22,8	596,3	22,7	591,7	22,7
	506,1	24,3	509,7	24,1	506,2	24,2
	413,1	25,7	420,6	25,3	413,1	25,7
2C6D_05	1655,7	1,7	1655,0	1,7	1655,7	1,7
	1563,4	5,1	1563,1	5,2	1563,3	5,1
	1577,8	7,1	1578,2	7,2	1578,1	7,2
	1458,6	8,3	1459,8	8,3	1458,4	8,2
	1379,1	9,9	1389,1	10,1	1385,1	9,9
	1341,4	11,7	1341,1	11,6	1346,6	11,6
	1212,3	12,3	1223,2	12,3	1213,9	12,2
	1112,9	14,1	1109,8	13,8	1114,2	13,7
	969,6	17,2	991,9	17,0	969,7	17,2
2C6D_15	1173,1	5,0	1173,1	5,1	1173,1	5,0
	1053,7	8,0	1053,8	8,0	1053,7	8,0
	995,8	10,7	995,9	10,7	995,9	10,7
	920,4	12,4	921,3	12,5	920,1	12,4
	852,4	14,7	856,0	14,7	854,9	14,7
	756,8	17,5	761,2	17,4	758,8	17,4
	663,1	19,5	667,1	19,4	663,2	19,5
	574,4	21,8	579,4	21,6	574,4	21,8
	479,3	24,1	487,5	23,7	479,3	24,0

	Procedimento1		Procedimento 2		Procedimento 3	
	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)
2C6D_25	985,6	9,6	985,4	9,6	985,6	9,6
	871,0	12,7	871,0	12,7	871,0	12,7
	789,6	14,0	790,1	14,0	789,7	14,0
	719,3	16,0	720,0	16,0	719,2	16,0
	683,5	17,6	684,6	17,6	685,8	17,7
	591,2	19,8	596,0	19,7	594,0	19,7
	509,4	21,7	514,3	21,5	510,0	21,6
	443,4	22,1	446,4	22,0	443,3	22,1
	372,1	24,2	377,3	23,9	372,1	24,2
2C6E_05	1540,9	1,7	1540,0	1,7	1540,9	1,7
	1469,7	5,2	1469,8	5,2	1469,8	5,2
	1463,7	7,2	1464,1	7,2	1463,9	7,2
	1365,1	7,8	1365,3	7,8	1363,8	7,8
	1366,9	9,4	1372,2	9,5	1372,2	9,5
	1231,1	11,1	1249,6	11,1	1238,1	11,0
	1055,0	13,1	1058,6	13,0	1056,3	13,0
	945,5	13,8	927,6	13,8	945,4	13,8
	832,2	17,7	823,5	17,8	832,0	17,7
2C6E_15	968,6	6,3	968,6	6,3	968,6	6,2
	856,3	9,0	856,4	9,0	856,3	9,0
	810,9	11,3	811,8	11,4	810,9	11,3
	756,4	13,2	757,9	13,2	756,6	13,2
	710,9	15,3	713,6	15,3	713,8	15,2
	636,6	18,1	639,8	18,0	637,9	18,0
	554,9	20,2	558,2	20,1	555,1	20,2
	493,6	21,9	496,6	21,8	493,6	21,9
	410,9	24,2	417,0	23,8	410,9	24,1
2C6E_25	1003,9	9,6	1003,7	9,7	1003,9	9,6
	886,5	13,0	886,6	13,0	886,5	13,0
	794,1	14,3	793,7	14,3	793,9	14,3
	736,9	16,5	737,6	16,5	736,2	16,4
	676,1	18,3	677,2	18,3	677,0	18,3
	582,4	20,5	586,1	20,4	584,5	20,4
	500,4	22,0	503,4	21,8	501,0	21,9
	437,7	22,1	443,5	21,8	437,8	22,0
	362,4	23,8	370,0	23,3	362,5	23,7
2C8E_05	1720,7	1,5	1720,1	1,5	1720,8	1,5
	1632,9	4,9	1632,9	4,9	1632,9	4,9
	1587,0	6,9	1587,1	6,9	1586,9	6,9
	1614,4	7,8	1616,7	7,9	1614,3	7,8
	1565,9	8,2	1578,8	8,4	1574,1	8,3
	1412,1	9,9	1422,7	9,9	1418,5	9,8
	1250,4	11,3	1272,4	11,2	1252,7	11,1
	1118,7	14,2	1122,9	14,1	1118,9	14,2
	951,6	16,4	986,5	16,0	951,8	16,3

	Procedimento1		Procedimento 2		Procedimento 3	
	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)
2C8E_15	861,6	7,2	861,6	7,2	861,6	7,2
	759,6	10,0	759,8	10,0	759,6	10,0
	725,2	11,6	725,6	11,6	725,4	11,6
	675,0	13,5	676,0	13,5	674,1	13,5
	629,1	15,5	631,0	15,4	631,1	15,4
	558,7	18,4	561,7	18,3	560,2	18,3
	481,4	20,2	485,1	20,0	481,5	20,2
	425,1	22,1	429,7	21,9	425,1	22,1
	355,3	24,3	360,4	24,0	355,3	24,2
2C8E_25	915,7	10,2	915,4	10,2	915,7	10,2
	750,0	13,4	750,1	13,5	750,0	13,4
	671,4	14,3	672,0	14,3	671,4	14,3
	615,4	16,7	616,2	16,8	615,6	16,8
	566,6	18,6	568,5	18,7	567,6	18,6
	491,4	21,1	494,5	21,0	493,4	21,0
	415,6	22,7	419,1	22,6	415,7	22,7
	362,3	23,5	365,6	23,4	362,3	23,5
	309,3	24,4	314,3	188,8	309,3	24,4
3C6D_05	1571,5	2,2	1571,1	2,2	1571,5	2,2
	1520,3	5,2	1520,2	5,2	1520,2	5,2
	1424,2	7,7	1422,8	7,5	1424,0	7,7
	1336,6	8,2	1337,5	8,2	1335,4	8,1
	1329,1	9,1	1331,0	9,1	1333,4	9,2
	1197,5	11,7	1211,5	11,7	1202,6	11,6
	1071,5	13,3	1088,7	13,2	1072,7	13,2
	882,5	12,8	903,7	12,7	882,6	12,8
	576,7	18,0	539,4	18,7	576,8	17,9
3C6D_15	1515,7	5,2	1515,7	5,2	1515,8	5,2
	1418,8	7,6	1418,8	7,6	1418,8	7,6
	1380,5	10,0	1381,2	10,1	1381,9	10,1
	1304,5	11,5	1305,4	11,5	1304,0	11,5
	1224,6	13,7	1226,0	13,7	1226,6	13,7
	1081,3	16,9	1085,3	16,8	1083,0	16,8
	950,6	18,9	953,5	18,8	951,1	18,9
	831,3	20,7	837,0	20,6	831,3	20,7
	689,9	22,8	697,0	22,6	689,9	22,8
3C6D_25	961,2	10,7	961,0	10,7	961,2	10,7
	829,0	14,0	829,1	14,0	829,0	14,0
	767,7	14,5	767,9	14,5	768,0	14,5
	698,1	17,0	698,3	17,1	696,8	17,0
	649,0	19,4	650,0	19,4	651,3	19,4
	557,9	22,0	562,1	21,9	559,7	21,9
	480,6	23,2	484,1	23,0	480,9	23,1
	415,4	24,2	419,3	24,0	415,5	24,2
	354,6	25,1	359,8	24,8	354,6	25,1

	Procedimento1		Procedimento 2		Procedimento 3	
	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)
3C6E_05	2037,8	1,8	2037,7	1,8	2037,9	1,8
	1953,7	5,0	1953,7	5,0	1953,7	185,0
	1972,3	6,9	1973,6	7,1	1971,6	6,9
	1840,7	8,2	1842,2	8,2	1841,4	8,2
	1771,6	9,2	1778,1	9,3	1774,3	9,2
	1631,9	12,1	1643,8	12,1	1636,6	12,0
	1475,7	13,5	1492,4	13,4	1477,2	13,5
	1340,2	14,8	1361,5	14,6	1340,6	14,7
	1065,8	17,4	1086,3	17,2	1066,0	17,3
3C6E_15	1321,1	4,6	1321,0	4,7	1321,1	4,7
	1202,6	8,3	1202,6	8,3	1202,6	8,3
	1114,2	10,5	1114,8	10,6	1114,0	10,5
	1028,7	12,5	1029,7	12,5	1028,2	12,5
	953,0	14,8	956,5	14,8	955,8	14,8
	832,0	18,0	837,4	17,8	833,7	17,9
	707,8	20,2	713,8	20,0	708,0	20,2
	603,3	22,1	609,3	21,9	603,3	22,1
	479,2	24,7	489,9	24,2	479,2	24,6
3C6E_25	1087,0	10,4	1086,9	10,4	1087,1	10,4
	964,4	13,5	964,4	13,6	964,4	13,5
	872,9	15,0	874,0	15,1	873,5	15,1
	784,9	17,5	785,8	17,5	785,1	17,5
	720,2	19,5	721,1	19,5	720,6	19,5
	614,7	22,0	618,9	21,9	616,8	21,9
	532,0	23,1	535,1	23,0	532,2	23,1
	463,2	23,5	468,1	23,3	463,2	23,4
	388,9	23,5	395,5	23,1	388,9	23,4
3C8E_05	1840,3	2,4	1840,1	2,4	1840,4	2,4
	1746,2	5,4	1746,1	5,4	1746,2	5,4
	1739,5	7,2	1740,1	7,3	1739,8	7,2
	1533,0	8,6	1533,7	8,6	1532,5	8,6
	1500,5	10,2	1506,2	10,2	1504,5	10,2
	1324,1	12,1	1339,8	11,9	1329,6	11,9
	1231,3	13,8	1240,6	13,7	1232,0	13,8
	1081,0	14,3	1084,3	14,4	1080,6	14,4
	1056,0	15,2	1040,8	15,3	1056,7	15,0
3C8E_15	1088,3	5,9	1088,2	5,9	1088,3	5,9
	964,0	8,1	964,2	8,2	964,0	8,2
	925,3	11,0	925,3	11,0	924,9	10,9
	862,6	12,9	864,2	12,9	863,4	12,9
	807,3	15,0	808,7	15,0	809,4	15,0
	715,9	18,3	718,4	18,3	716,9	18,3
	616,6	20,8	620,4	20,6	616,9	20,7
	533,8	22,9	536,1	22,8	533,9	22,9
	430,3	25,6	436,8	25,2	430,3	25,5

	Procedimento1		Procedimento 2		Procedimento 3	
	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)
3C8E_25	1103,2	10,1	1103,0	10,1	1103,3	10,1
	977,1	13,7	977,2	13,7	977,1	13,7
	902,7	14,9	902,6	14,9	902,8	14,9
	820,0	18,0	820,4	18,0	819,6	17,9
	751,0	20,5	752,0	20,5	752,2	20,5
	633,0	23,6	636,9	23,5	633,8	23,6
	533,0	25,4	536,9	25,2	533,4	25,3
	455,4	25,6	460,0	25,5	455,3	25,6
	384,4	25,8	385,5	26,1	384,4	25,8
4C6D_05	2120,6	2,4	2119,9	2,4	2120,8	2,3
	1985,2	5,5	1985,2	5,5	1985,2	5,5
	2033,5	7,7	2035,9	7,9	2034,7	7,8
	1763,2	9,0	1765,4	9,0	1762,3	9,0
	1681,0	11,3	1689,4	11,4	1685,1	11,4
	1560,1	12,5	1557,7	12,4	1563,7	12,5
	1366,2	14,7	1378,5	14,6	1368,1	14,6
	1260,1	17,6	1262,6	17,6	1260,2	17,6
	976,3	19,9	1007,0	19,5	976,5	19,8
4C6D_15	941,1	7,6	941,1	7,6	941,1	7,6
	869,3	10,9	869,3	10,9	869,3	10,9
	844,8	12,2	844,8	12,2	844,6	12,2
	793,6	12,4	793,8	12,4	793,1	12,3
	759,5	14,8	760,8	14,8	761,4	14,8
	689,9	17,8	691,5	17,7	691,5	17,7
	632,3	20,1	633,6	20,2	631,9	20,2
	572,7	21,7	573,3	21,5	572,8	21,5
	475,9	24,0	479,8	23,6	475,6	23,9
4C6D_25	848,6	13,8	848,6	151,3	848,6	13,8
	777,8	16,5	777,9	16,5	777,8	16,5
	701,5	16,9	701,9	16,9	701,5	16,9
	646,9	18,7	647,7	18,8	647,2	18,8
	594,3	20,3	595,0	20,3	596,9	20,3
	510,5	21,9	513,3	21,8	510,3	21,9
	448,8	23,0	450,2	23,0	448,7	23,0
	403,0	23,0	405,1	22,9	403,0	23,0
	352,8	23,4	355,3	23,2	352,7	23,4
4C6E_05	1491,7	3,1	1491,1	3,1	1491,7	3,1
	1422,9	6,0	1422,9	6,1	1422,9	6,0
	1409,0	7,9	1408,7	7,9	1408,3	7,8
	1301,1	8,7	1303,8	8,8	1303,9	8,8
	1222,5	10,4	1223,6	10,4	1224,8	10,4
	1147,6	13,0	1155,9	13,0	1151,4	12,9
	1058,4	13,9	1067,0	13,8	1058,8	13,8
	889,7	15,5	898,8	15,4	889,6	15,5
	747,7	20,4	760,9	20,2	747,7	20,4

	Procedimento1		Procedimento 2		Procedimento 3	
	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)
4C6E_15	1240,5	6,6	1240,4	6,7	1240,5	6,6
	1130,8	10,1	1130,8	10,1	1130,8	10,1
	1061,0	12,1	1061,4	12,2	1060,8	12,1
	971,0	13,0	971,8	13,1	970,5	13,0
	917,6	15,4	919,3	15,4	919,1	15,4
	809,7	18,4	814,2	18,3	812,1	18,3
	708,4	20,4	712,0	20,4	707,9	20,5
	624,1	21,9	625,5	21,9	624,1	21,9
	517,8	23,6	528,8	23,0	518,0	23,3
4C6E_25	933,2	12,4	933,2	12,4	933,2	12,4
	830,4	15,0	830,4	15,0	830,4	15,0
	787,5	16,4	788,0	16,4	787,7	16,4
	690,8	19,1	690,7	19,1	690,2	19,1
	634,0	21,0	635,0	21,0	635,3	21,0
	543,9	22,8	546,5	22,7	545,6	22,7
	477,6	23,4	480,2	23,3	477,7	23,4
	420,4	23,0	421,8	22,9	420,5	22,9
4C8E_05	362,0	23,9	365,7	23,6	362,0	23,8
	1751,6	2,3	1751,3	2,3	1751,6	2,3
	1645,4	5,6	1645,4	5,6	1645,4	5,5
	1655,0	7,6	1655,0	7,7	1654,7	7,6
	1492,0	8,5	1494,1	8,6	1490,6	8,5
	1456,4	9,9	1458,7	9,9	1461,7	10,0
	1365,4	12,2	1373,0	12,1	1371,6	12,1
	1244,1	13,3	1256,7	13,1	1246,1	13,2
4C8E_15	1089,7	15,7	1096,5	15,6	1089,7	15,7
	900,7	17,9	930,1	17,5	900,7	17,8
	960,7	7,8	960,6	7,8	960,7	7,8
	872,8	11,2	872,9	11,2	872,7	11,2
	829,0	12,8	829,7	12,9	828,9	12,8
	754,9	13,6	755,2	13,6	754,6	13,6
	717,9	15,9	720,1	15,9	719,8	15,9
	645,9	18,6	647,5	18,6	646,7	18,6
4C8E_25	561,3	20,4	566,5	20,2	561,7	20,3
	493,8	21,5	493,4	21,6	493,8	21,6
	427,9	23,8	430,6	23,8	427,7	24,0
	879,9	12,5	879,8	12,6	879,9	12,5
	743,2	14,7	743,6	14,7	743,3	14,7
	689,1	17,9	689,6	17,9	688,7	17,8
	604,4	18,9	605,9	19,0	604,6	18,9
	549,9	20,8	550,7	20,8	550,6	20,8
	477,4	22,0	482,3	21,8	477,9	21,9
	412,4	23,2	415,4	23,0	412,7	23,1
	365,6	23,3	369,6	23,2	365,5	23,4
	316,0	23,3	319,9	23,0	316,0	23,2

	Procedimento1		Procedimento 2		Procedimento 3	
	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)
5C6D_05	1374,9	1,2	1374,7	1,2	1374,9	1,2
	1319,2	4,5	1319,2	4,5	1319,2	4,5
	1316,1	6,8	1314,6	6,6	1314,4	6,6
	1231,1	7,6	1233,8	7,7	1234,3	7,7
	1178,2	9,2	1178,9	9,2	1179,6	9,2
	1120,8	10,6	1123,8	10,6	1124,9	10,5
	1017,2	12,1	1026,8	12,0	1017,9	12,0
	915,6	14,2	927,2	14,1	915,6	14,2
	789,4	17,0	810,8	16,7	789,4	16,9
5C6D_15	806,5	8,2	806,4	8,3	806,5	8,2
	742,1	11,6	742,3	11,7	742,1	11,6
	702,7	12,8	703,0	12,8	702,6	12,8
	663,6	12,9	663,4	12,9	663,1	12,9
	624,3	15,1	626,2	15,1	625,7	15,1
	574,3	17,8	575,5	17,8	574,3	17,8
	502,7	19,3	506,3	19,2	502,7	19,3
	463,1	19,6	463,0	19,6	463,0	19,6
	398,5	24,7	402,7	24,5	398,5	24,7
5C6D_25	787,8	12,4	787,7	12,4	787,8	12,4
	680,5	15,2	680,6	15,2	680,5	15,2
	614,1	17,1	614,6	17,1	614,1	17,1
	550,3	17,7	551,2	17,8	550,7	17,7
	511,1	19,3	513,1	19,3	512,8	19,3
	444,1	21,3	448,2	21,2	445,8	21,2
	388,5	23,3	391,7	23,1	388,7	23,2
	345,5	23,9	348,9	23,7	345,5	23,9
	297,9	25,6	302,3	25,2	297,8	25,6
5C6E_05	1878,3	2,2	1877,9	2,2	1878,3	2,2
	1867,5	5,3	1867,5	5,3	1867,5	5,3
	1871,8	7,2	1871,6	7,2	1871,4	7,2
	1741,8	8,3	1741,5	8,3	1739,9	8,2
	1689,2	9,4	1697,7	9,5	1694,7	9,5
	1578,4	11,6	1590,2	11,5	1582,9	11,5
	1411,7	12,9	1423,7	12,8	1412,6	12,8
	1272,7	14,2	1291,9	14,1	1272,8	14,2
	1051,6	16,4	1073,8	16,2	1051,7	16,4
5C6E_15	1180,6	6,6	1180,5	6,6	1180,6	6,6
	1067,6	10,2	1067,7	10,2	1067,6	10,2
	1023,9	12,0	1024,1	12,1	1023,7	12,0
	929,0	12,6	929,9	12,6	928,2	12,6
	883,1	14,9	884,4	14,9	885,0	14,9
	789,4	18,0	792,0	18,0	790,6	18,0
	689,7	20,5	694,5	20,4	689,9	20,5
	611,9	21,8	619,8	21,5	611,8	21,8
	495,8	24,2	503,4	23,9	495,8	24,2

	Procedimento1		Procedimento 2		Procedimento 3	
	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)
5C6E_25	1135,8	8,3	1135,7	8,4	1135,8	8,3
	1141,4	13,5	1141,6	13,5	1141,4	13,5
	1003,8	16,1	1004,6	16,2	1003,3	16,1
	872,6	17,9	875,1	18,0	873,2	17,9
	774,4	19,7	778,0	19,7	776,3	19,7
	647,4	22,1	652,1	22,0	647,3	22,1
	538,9	23,5	545,6	23,3	539,3	23,4
	453,8	24,4	458,7	24,3	453,6	24,5
	376,8	25,0	385,5	24,5	376,8	25,0
5C8E_05	1432,4	2,0	1432,5	2,0	1432,5	2,0
	1400,4	5,1	1400,4	5,1	1400,4	5,1
	1358,0	7,2	1359,6	7,4	1359,3	7,4
	1277,9	8,4	1279,4	8,5	1276,5	8,4
	1242,7	9,5	1245,4	9,5	1247,0	9,5
	1151,5	11,2	1162,2	11,1	1155,7	11,0
	1059,2	13,4	1066,6	13,3	1060,0	13,3
	925,4	15,1	946,0	15,0	925,3	15,1
	796,9	17,1	815,5	16,8	796,9	17,0
5C8E_15	1895,0	5,0	1894,8	5,1	1895,0	5,0
	1729,7	8,6	1729,8	8,7	1729,7	8,6
	1653,7	11,3	1655,7	11,4	1653,5	11,3
	1502,8	12,7	1505,3	12,7	1502,7	12,7
	1384,1	14,8	1387,9	14,8	1387,6	14,8
	1203,0	18,1	1207,6	18,1	1203,9	18,1
	1029,7	20,4	1036,8	20,4	1029,7	20,4
	859,0	22,8	869,7	22,5	859,0	22,8
	660,8	26,3	677,3	25,7	660,8	26,2
5C8E_25	965,2	11,2	965,1	11,2	965,2	11,2
	817,2	13,6	817,5	13,6	817,2	13,6
	737,1	15,4	737,6	15,5	737,2	15,5
	666,4	17,6	667,4	17,7	666,0	17,6
	601,6	19,3	605,2	19,3	602,6	19,3
	510,6	20,5	515,6	20,4	512,5	20,4
	437,2	21,9	440,5	21,8	437,2	21,9
	379,2	22,1	383,5	21,9	379,2	22,1
	324,0	21,5	329,4	21,2	324,0	21,5
6C6D_05	1128,6	2,6	1128,2	2,6	1128,5	2,6
	1067,8	5,9	1067,9	5,9	1067,8	5,9
	1045,8	8,0	1045,4	7,9	1044,8	7,8
	972,6	8,4	973,7	8,4	971,0	8,3
	904,2	9,7	907,0	9,7	906,9	9,7
	834,9	12,0	843,3	11,9	838,6	11,8
	725,0	13,3	733,0	13,3	725,3	13,3
	653,2	14,2	655,1	14,1	653,4	14,1
	531,5	17,4	547,7	17,0	531,5	17,3

	Procedimento1		Procedimento 2		Procedimento 3	
	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)
6C6D_15	1385,6	6,2	1385,4	6,3	1385,6	6,2
	1205,6	9,9	1205,7	9,9	1205,6	9,9
	1143,5	11,8	1144,1	11,9	1143,0	11,8
	1027,9	13,1	1030,1	13,2	1028,1	13,1
	939,6	15,6	943,4	15,6	941,8	15,6
	812,6	19,3	818,1	19,3	812,6	19,3
	667,4	21,7	674,3	21,5	667,4	21,7
	558,7	23,7	564,5	23,5	558,8	23,7
	441,5	27,0	449,5	26,5	441,4	27,0
6C6D_25	1087,5	10,2	1087,4	10,3	1087,5	10,2
	946,2	13,2	946,2	13,2	946,1	13,2
	868,2	15,3	867,9	15,3	867,4	15,3
	768,8	17,9	770,1	17,9	768,4	17,9
	689,0	19,7	690,8	19,7	691,3	19,7
	580,0	22,0	585,5	21,9	582,0	21,9
	488,9	23,4	493,5	23,3	488,7	23,4
	418,4	23,6	422,6	23,4	418,5	23,6
	350,0	24,3	354,4	24,0	350,0	24,3
6C6E_05	1214,4	3,4	1214,2	3,4	1214,4	3,4
	1126,3	6,4	1126,3	175,9	1126,3	6,4
	1107,2	7,8	1107,6	7,8	1107,9	7,9
	1003,5	8,5	1006,0	8,6	1003,7	8,5
	952,1	10,2	954,2	10,2	955,8	10,2
	877,5	12,2	885,8	12,1	880,7	12,1
	736,4	14,0	742,3	13,9	736,7	13,9
	663,2	14,8	665,9	14,7	663,4	14,7
	549,0	16,9	556,2	16,7	549,0	16,8
6C6E_15	1069,2	8,2	1069,1	8,2	1069,2	8,2
	921,2	11,5	921,4	11,5	921,2	11,5
	882,1	12,6	883,2	12,7	882,5	12,7
	797,5	13,4	798,5	13,4	797,7	13,4
	745,9	15,7	746,1	15,7	746,9	15,7
	653,7	18,9	657,9	18,8	654,5	18,8
	561,0	21,3	565,3	21,2	560,8	21,3
	476,9	23,4	480,3	23,3	476,9	23,4
	396,8	25,2	403,9	24,8	396,8	25,2
6C6E_25	699,6	14,7	699,6	14,7	699,6	14,7
	588,9	17,1	588,9	17,1	588,9	17,1
	530,9	17,8	531,1	17,8	530,4	17,8
	467,7	19,7	468,1	19,7	467,8	19,7
	422,0	21,3	424,1	21,3	423,7	21,3
	362,9	23,3	364,9	23,2	363,8	23,2
	311,2	24,2	314,3	24,0	311,4	24,1
	271,6	24,4	272,9	24,2	271,6	24,3
	232,2	24,7	235,7	24,4	232,2	24,8

	Procedimento1		Procedimento 2		Procedimento 3	
	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)
6C8E_05	1285,9	2,8	1285,5	2,8	1285,9	2,8
	1206,5	5,7	1206,5	5,8	1206,5	5,7
	1159,4	7,4	1160,4	7,4	1158,8	7,3
	1038,9	8,3	1040,9	8,4	1041,2	8,4
	1023,5	9,4	1030,1	9,4	1024,6	9,4
	933,8	11,4	939,3	11,3	936,8	11,3
	817,3	12,9	824,8	12,8	818,1	12,8
	693,0	14,8	709,0	14,7	692,8	14,9
	554,0	17,0	566,0	16,7	553,9	16,9
6C8E_15	1042,7	7,3	1042,6	7,3	1042,7	7,3
	868,7	11,3	868,9	11,3	868,8	11,3
	812,6	12,7	813,3	12,8	811,9	12,7
	732,8	13,1	734,8	13,2	733,2	13,1
	684,9	22,0	685,0	15,9	686,0	22,0
	595,2	19,6	599,2	19,5	596,3	19,5
	498,9	21,7	502,4	21,7	498,7	21,8
	420,3	23,8	424,4	23,6	420,3	23,7
	343,2	26,3	348,9	25,8	343,2	26,2
6C8E_25	570,4	15,4	570,5	15,4	570,4	15,4
	491,7	16,9	491,7	16,9	491,7	16,9
	465,4	17,8	465,2	17,8	464,9	17,8
	421,0	19,8	421,9	19,8	420,7	19,8
	381,7	21,5	382,7	21,5	382,5	21,5
	335,5	23,3	337,0	23,3	336,0	23,3
	289,4	24,6	291,5	24,5	289,6	24,6
	256,3	25,8	257,7	25,6	256,3	25,8
	222,6	26,4	225,7	26,1	222,6	26,4
7C6D_05	1465,9	2,5	1465,8	2,5	1465,9	2,5
	1409,9	5,7	1409,9	5,8	1409,9	5,7
	1368,0	8,0	1368,1	8,0	1367,9	8,0
	1263,1	9,0	1264,1	9,1	1262,9	9,0
	1218,0	10,4	1224,8	10,5	1221,2	10,4
	1133,3	12,1	1137,8	12,0	1135,1	12,0
	1021,3	13,7	1033,4	13,5	1023,1	13,5
	920,1	15,3	928,7	15,2	920,2	15,2
	773,6	18,3	791,5	18,0	773,6	18,3
7C6D_15	1098,5	6,7	1098,3	6,7	1098,5	6,7
	975,4	10,4	975,6	10,5	975,5	10,4
	911,2	12,5	911,4	12,5	911,5	12,6
	839,9	13,5	840,8	13,5	839,2	13,5
	779,6	15,8	782,2	15,8	780,3	15,8
	676,3	19,1	680,7	19,0	676,9	19,0
	583,2	21,1	587,5	21,0	583,3	189,5
	497,7	23,6	504,3	23,3	497,7	23,6
	412,1	24,6	419,4	24,2	412,1	24,6

	Procedimento 1		Procedimento 2		Procedimento 3	
	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)
7C6D_25	688,6	9,7	688,4	9,7	688,5	9,7
	682,7	13,4	682,5	13,5	682,6	13,4
	562,4	15,9	563,0	16,0	561,9	15,9
	544,9	16,7	545,1	16,7	544,3	16,6
	529,7	18,1	530,7	18,1	531,4	18,2
	458,5	19,8	464,8	19,8	460,0	19,7
	382,4	21,8	386,9	21,6	382,9	21,7
	331,2	23,3	336,8	22,9	331,4	23,1
	273,7	24,4	279,3	24,0	273,7	24,4
7C6E_05	1422,5	3,0	1422,2	3,0	1422,5	3,0
	1369,4	6,2	1369,4	6,2	1369,4	6,2
	1342,9	7,9	1344,5	8,0	1344,2	8,0
	1244,5	9,1	1246,9	9,2	1243,2	9,1
	1183,3	10,2	1188,9	10,2	1190,3	10,2
	1093,4	12,4	1101,0	12,3	1098,1	12,3
	976,6	13,9	986,9	13,8	976,8	13,9
	874,7	15,3	880,2	15,3	874,6	15,4
	750,5	17,9	764,6	17,6	750,6	17,8
7C6E_15	1222,6	6,7	1222,5	6,7	1222,6	6,7
	1077,4	10,4	1077,5	10,4	1077,4	10,4
	1009,2	12,6	1009,7	12,7	1009,0	12,6
	929,5	13,4	930,9	13,5	929,5	13,4
	852,8	15,8	854,5	15,8	853,2	15,8
	741,2	18,8	746,7	18,6	743,1	18,7
	641,4	21,2	646,2	21,1	641,7	21,2
	549,0	22,8	553,8	22,6	549,0	22,8
	457,8	24,9	466,2	24,5	457,8	24,8
7C6E_25	674,8	11,7	674,7	11,7	674,8	11,7
	585,1	15,7	585,3	15,7	585,1	15,7
	498,8	14,9	499,3	14,9	499,2	14,9
	468,0	17,0	469,0	17,0	468,1	17,0
	454,7	18,9	456,8	19,0	456,7	19,0
	396,3	20,3	399,3	20,3	397,5	20,3
	334,0	21,5	337,8	21,3	334,4	21,4
	294,1	22,3	297,2	22,1	294,2	22,2
	256,9	24,6	262,2	24,2	256,8	24,6
7C8E_05	1606,4	1,8	1606,2	1,8	1606,3	1,8
	1562,6	5,0	1562,6	5,1	1562,6	5,0
	1504,1	7,2	1504,4	7,2	1502,7	7,1
	1417,4	8,2	1419,3	8,2	1419,2	8,2
	1373,3	9,5	1383,1	9,6	1376,4	9,5
	1273,8	11,5	1284,7	11,4	1278,6	11,3
	1162,6	13,1	1173,6	13,0	1163,2	13,1
	1044,6	14,8	1054,2	14,7	1044,6	14,8
	890,7	17,3	910,8	17,1	890,6	17,3

	Procedimento1		Procedimento 2		Procedimento 3	
	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)	E (Mpa)	φ (°)
7C8E_15	1388,6	6,4	1388,5	6,4	1388,6	6,4
	1241,1	10,3	1241,3	10,3	1241,2	10,3
	1149,7	12,3	1150,7	12,4	1149,9	12,3
	1061,6	13,2	1062,5	13,2	1060,6	13,2
	990,7	15,6	992,8	15,6	992,2	15,6
	880,5	18,5	886,9	18,4	882,4	18,4
	760,6	20,9	766,6	20,8	760,6	20,9
	655,6	22,8	662,9	22,7	655,6	22,8
	544,8	25,2	554,0	24,8	544,8	25,2
7C8E_25	786,0	10,6	785,8	10,6	786,0	10,6
	679,0	13,5	679,1	13,5	679,0	13,5
	581,2	15,8	581,5	15,8	581,0	15,8
	536,7	16,2	536,9	16,2	536,5	16,2
	529,1	17,0	531,1	17,1	530,8	17,0
	462,6	17,9	467,9	17,9	464,8	17,8
	389,6	19,1	393,9	19,0	390,3	19,0
	344,3	19,3	350,1	19,4	343,9	19,5
	292,2	20,8	298,1	20,5	292,3	20,7
8C6D_05	1787,9	1,1	1787,8	1,1	1788,0	1,1
	1791,0	4,2	1791,0	4,3	1791,0	4,2
	1780,7	6,1	1781,1	6,1	1780,8	6,1
	1711,3	7,1	1714,3	7,1	1708,4	7,0
	1690,1	8,2	1696,4	8,3	1693,7	8,3
	1615,7	9,5	1623,8	9,5	1616,8	9,5
	1522,0	10,5	1531,9	10,4	1524,2	10,4
	1446,9	11,5	1468,3	11,4	1446,9	11,5
	1301,1	12,8	1322,0	12,8	1301,1	12,8
8C6D_15	1098,1	5,6	1098,0	5,6	1098,1	5,6
	1039,0	8,2	1039,0	8,2	1039,1	8,2
	995,6	9,8	996,1	9,8	996,7	9,9
	936,9	10,4	938,1	10,4	937,3	10,4
	922,4	12,5	923,5	12,5	924,7	12,5
	861,5	14,6	863,2	14,5	864,7	14,5
	799,1	16,2	800,9	16,2	799,7	16,2
	719,7	17,9	723,7	17,9	719,6	18,0
	621,9	19,8	629,4	19,6	621,7	19,8
8C6D_25	1179,8	8,1	1179,5	8,2	1179,8	8,1
	990,8	11,7	991,0	11,7	990,8	11,7
	885,5	13,5	886,4	13,6	885,2	13,5
	815,9	13,6	816,4	13,6	815,0	13,6
	812,7	15,5	823,1	15,7	818,1	15,6
	685,2	18,1	692,3	18,0	688,8	18,0
	585,0	19,3	590,2	19,2	585,6	19,2
	830,2	18,1	796,9	18,6	829,7	18,3
	519,5	25,1	538,3	24,4	519,5	25,0

	Procedimento 1		Procedimento 2		Procedimento 3	
	E (Mpa)	ϕ (°)	E (Mpa)	ϕ (°)	E (Mpa)	ϕ (°)
8C6E_05	1507,1	1,0	1506,9	1,0	1507,1	1,0
	1505,3	4,0	1505,3	4,1	1505,3	4,0
	1497,2	6,1	1495,1	5,9	1497,3	6,1
	1447,1	7,0	1449,8	7,0	1448,0	7,0
	1412,7	7,9	1415,3	8,0	1410,8	7,9
	1374,9	9,2	1384,7	9,1	1379,8	9,1
	1301,9	10,2	1307,7	10,2	1301,6	10,2
	1226,1	10,8	1243,1	10,8	1226,2	10,8
	1130,3	12,1	1144,4	12,0	1130,3	12,1
8C6E_15	1539,6	2,3	1539,5	2,3	1539,6	2,3
	1468,6	6,0	1468,6	6,0	1468,5	5,9
	1401,4	8,5	1400,4	8,4	1401,1	8,5
	1309,6	9,6	1311,5	9,7	1311,6	9,7
	1258,6	11,3	1258,2	11,4	1258,5	11,4
	1146,4	13,1	1153,2	13,0	1150,2	13,0
	1028,3	15,1	1038,0	15,0	1028,2	15,1
	914,5	16,7	924,6	16,6	914,5	16,7
	783,8	19,1	799,8	18,8	783,8	19,2
8C6E_25	1197,8	5,7	1197,4	5,8	1197,8	5,7
	1005,5	9,7	1005,9	9,7	1005,5	9,7
	916,2	11,5	917,4	11,5	917,0	11,5
	830,3	13,1	832,1	13,3	830,8	13,2
	784,4	15,2	788,6	15,3	786,8	15,3
	689,8	17,6	697,3	17,6	692,7	17,5
	594,5	18,8	602,5	18,6	595,2	18,7
	493,4	22,2	504,7	21,8	493,6	22,0
	424,0	23,7	434,0	23,3	424,0	23,6
8C8E_05	1977,1	0,5	1976,9	0,5	1977,3	0,5
	1968,5	3,5	1968,4	3,5	1968,5	3,5
	1999,5	5,6	2001,9	5,7	1998,5	5,5
	1874,8	6,7	1872,6	6,6	1876,0	6,7
	1852,6	7,8	1860,7	7,9	1868,0	7,9
	1774,8	9,0	1784,6	8,9	1780,5	8,8
	1679,9	10,3	1688,4	10,3	1681,0	10,3
	1594,0	10,7	1611,9	10,6	1594,4	10,6
	1415,2	12,4	1444,4	12,3	1415,2	12,3
8C8E_15	1425,1	3,8	1425,0	3,9	1425,1	3,8
	1344,8	6,7	1345,1	6,7	1344,9	6,7
	1342,0	9,0	1342,5	9,0	1343,3	9,0
	1242,7	9,7	1241,9	9,6	1240,7	9,6
	1209,8	11,4	1214,9	11,5	1214,3	11,4
	1095,7	13,5	1098,8	13,5	1098,4	13,4
	1011,7	14,7	1013,3	14,7	1011,3	14,7
	914,1	16,3	922,2	16,3	913,8	16,4
	801,6	18,1	807,4	18,0	801,5	18,1
8C8E_25	1215,3	8,1	1215,0	8,1	1215,3	8,1
	1002,9	11,4	1003,1	11,5	1002,9	11,4
	891,9	12,8	892,5	12,8	892,4	12,8
	830,6	13,0	832,2	13,0	830,8	13,0
	820,7	15,6	823,2	15,6	823,4	15,6
	715,6	18,2	725,9	18,0	720,1	18,0
	595,1	19,9	603,5	19,6	596,8	19,7
	500,1	21,5	501,8	21,6	499,9	21,6
	417,1	23,4	424,4	22,8	416,8	23,2